Eine Methode
zur Bestimmung der Gasspannung im Splinte der Nadelbäume.

Inaugural Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

von der

philosophischen Facultät

der

Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

genehmigt

und nebst den beigefügten Thesen öffentlich zu verteidigen

am 1. Februar 1892

von

Karl Pappenheim

aus Berlin.

Opponenten:

Stud. phil. **Alfred Schmid,**
Stud. phil. **Karl Supprian,**
Stud. phil. **Ernst Zermelo.**

Druck von Gebr. Gotthelft, Cassel.

Separat-Abdruck
aus Bot. Centralblatt 1892
Bd. XLIX.

Seinen lieben Eltern

in Liebe und Dankbarkeit gewidmet

vom

Verfasser.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535703_0135

Den Untersuchungen, welche auf die Erforschung der bei dem Saftsteigen thätigen Kräfte gerichtet waren, ist vielfach der Vorwurf gemacht worden, dass sie nicht auf streng physikalischer Grundlage ruhten, und wohl mit Recht; jedenfalls ist die Forderung zu erfüllen, dass die Pflanzenphysiologie sich nicht in Widerspruch mit anerkannten, physikalischen Wahrheiten setzt. Doch lässt sich etwas zu Gunsten der muthig aufstrebenden Tochterwissenschaft anführen. Gerade diejenigen Kapitel der Physik, die in der Physiologie eine grosse Rolle spielen — ich erinnere nur an die Diffusions- und Capillarerscheinungen — sind keineswegs derartig ausgebaut, dass sie jederzeit dem Physiologen die gewünschte Hilfe darbieten.

Uns interessirt hier besonders die Capillarität. Bei den Untersuchungen über diese Kraft haben sich die Physiker im Wesentlichen auf unorganische Objekte, offenbar infolge der grösseren Homogenität jener Gebilde beschränkt. Infolge dessen möchte der Physiologe vielfach berechtigt sein, die Anwendung der auf solche Weise von der Physik gewonnenen Gesetze auf die Vorgänge an den organischen Gebilden zu beanstanden. So hatte man seit Langem versucht, das Saftsteigen durch die in den Pflanzen wirkendeu Capillarkräfte zu erklären, und es war scheinbar ein Leichtes, dieser Lehre durch den Nachweis der allzu grossen Weite der Leitungsbahnen im Verhältniss zur Höhe, bis zu welcher der Saft in den Pflanzen thatsächlich steigt, den Boden zu entziehen. Dennoch glauben heute noch einige Forscher auf Grund von Versuchen daran festhalten zu dürfen, dass der Capillarität bei der Wasserhebung in der Pflanze eine hervorragende Rolle zufalle.

Einen ähnlichen Streit rief die von Th. Hartig herrührende Entdeckung des in den Pflanzen herrschenden negativen Luftdruckes hervor. Für den Lehrsatz der Physik, dass durch die Erzeugung eines Vacuums eine Wassersäule von höchstens 10 m. Länge gehoben werden könne, glaubten manche Pflanzenphysiologen eine Ausnahme statuiren zu dürfen. Dieser Versuch ist jedoch nunmehr wohl endgültig aufgegeben und damit wird zugestanden, dass der Luftdruck zur Erklärung des Saftsteigens in den höheren Bäumen nicht ausreiche.

Unter solchen Umständen ist es freilich aussichtslos, zur Beintwortung der Frage nach der Ursache des Saftsteigens durch naee Untersuchung des Grades der in den Bäumen bestehenden

Luftverdünnung beizutragen. Die einzige Hoffnung ist eben die, auf solchem Wege zum Verständnisse des Spieles einer möglicherweise sekundären Ursache zu gelangen. In diesem Sinne machte ich mich ans Werk.

Die Manometerversuche Th. Hartigs*) und Böhms**) ergaben, wie von Höhnel***) nachwies, „dass der Maximalstand des Quecksilbers einen Minimalwerth für den negativen Druck der Holzluft angibt, d. h. der negative Druck dieser muss noch grösser sein als der höchste Quecksilberstand anzeigt (p. 82)." Obgleich nun von Höhnel der Meinung war, „dass mit einem geeigneten Apparate mit Hülfe der Hartig'schen Methode in der That der negative Druck der Holzluft gemessen werden könnte" (p. 83), so setzte er doch die Hartig-Böhm'schen Untersuchungen nicht fort. Eine eigene Methode, welche darin bestand, dass in gefässführenden, unter Quecksilber angeschnittenen Zweigen das Metall bis zu einer bestimmten Höhe aufsteigt, ermöglichte ihm die Gewinnung sicherer Angaben betreffs des Verdünnungsgrades der Binnenluft innerhalb der Pflanzentheile, welche in nächster Nähe des Ortes der Transpiration gelegen sind. Dass dort die Luftverdünnung einen ganz erheblichen Grad zu erreichen vermag, ist besonders noch aus den Böhm'schen Versuchen†) ersichtlich, und so dürfen wir wohl diese Thatsache als zweifellos richtig annehmen. Da es sich jedoch zunächst nicht darum handelt, die Tragweite der von der Krone ausgehenden Saugung zu ermitteln, so kommen die von Höhnel'schen Resultate vorläufig nicht in Betracht. Ausserdem stehen die Tracheiden, welche im Nadelholze die Gefässe ersetzen, mit einander durch Membranen in Verbindung, welche für Quecksilber gänzlich impermeabel sind, so dass sich also auch die Methode jenes Forschers hier nicht anwenden lässt. Denn wenn es auch möglich ist, die Tracheiden unter Quecksilber anzuschneiden und die Menge des in die einzelnen Zellen eingedrungenen Metalls und der darin verbliebenen Luft zu bestimmen, so scheitern doch alle Versuche, aus diesen beiden Grössen weitere Schlüsse zu ziehen, an dem Umstande, dass diese Zellen neben der verdünnten Binnenluft eine nicht bestimmbare Wassermenge enthielten, die beim Eindringen des Quecksilbers in die angrenzenden unverletzten Tracheiden gepresst wurde.

Wohl deshalb unternahm es R. Hartig††), gestützt auf ein umfangreiches Material ebenso sorgsamer wie mühevoller Beob-

*) Bot. Zeitung. 1861. p. 17 und Bot. Zeitung. 1863. p. 277.

**) Ueber die Wasserbewegung in transpirirenden Pflanzen. Landwirthschaftl. Versuchsstationen XX. (1877.) p. 357.

***) Beiträge zur Kenntniss der Luft- und Saftbewegung in der Pflanze. Pringsheim's Jahrb. XII. p. 47.

†) Ber. d. Deutsch. Bot. Ges. VII. p. 50.

††) Untersuchungen aus dem forstbotanischen Institut zu München. II. 1882. III. 1883. Das Holz der deutschen Nadelwaldbäume 1885.

achtungen, auf einem anderen, von Sachs***) angedeutetem Wege dieser Frage beizukommen. Seine Analysen der deutschen Waldbäume hinsichtlich der Vertheilung der Holzsubstanz, des Wassers und des Hohlraumes in verschiedenen Stammestheilen und zu verschiedenen Jahreszeiten liessen ihn erkennen, zu welcher Zeit das Holz am wasserreichsten sei. R. Hartig†) ging nun von der Annahme aus, dass in diesem Falle die in jenem Holz befindliche Luft die Dichtigkeit der Atmosphäre besitze. Da nun, wie von Höhnel††) nachgewiesen hatte, das Gefässsystem, welchem bei den Coniferen die Tracheiden entsprechen, nicht mit dem Durchlüftungssystem communicirt, mithin also die Binnenluftmenge höchstens auf dem Wege der Diffusion langsam verändert werden könnte, glaubte R. Hartig†††) aus einer Abnahme des Wassers im Holze auf eine dementsprechende Luftverdünnung schliessen zu dürfen.

Thatsächlich beobachtete er „eine durch praevalirende Transpiration bedingte Wasserabnahme im oberen Baumtheile"; willkürlich nahm er an, dass in allen Baumhöhen eine dem wasserreichsten Zustande entsprechende Luftmenge sich befinde. So gelangte er zu dem Resultate, dass die Luft von unten nach oben zunehmend verdünnt sei*).

Diese Schlussfolgerung ist infolge jener willkürlichen Annahme nicht einwurfsfrei: R. Hartig stellte nur das Volumen des Luftraumes in verschiedenen Theilen des Stammes fest; über die Menge und die Tension der Binnenluft vermochte er auf Grund seiner Analysen nichts Gewisses anzugeben. Hinsichtlich dieser Frage sind seine Resultate vieldeutig.

Bevor ich eine Reihe von mir angestellter Versuche mittheile, werde ich, um nicht später die Darstellung durch längere physikalische Erörterungen unterbrechen zu müssen, einige Betrachtungen vorausschicken, welche den Zweck haben, die Anwendung der bekannten hydrostatischen und hydrodynamischen Lehrsätze auf die im Holze vorliegenden Verhältnisse einzuleiten. Physikalische Verstösse in neueren Arbeiten, offenbar hervorgerufen durch Unkenntniss der Vorgänge in mikroskopischen Röhren, lassen mir diese Form der Darstellung gerechtfertigt erscheinen.

I. Hydromechanische Betrachtungen.

Der Holzkörper der Coniferen setzt sich aus Tracheiden zusammen, welche untereinander durch die behöften Poren in Verbindung stehen. Jeder Hoftüpfel hat in seiner Mitte eine Schliessmembran, welche für Wasser in hohem Grade filtrationsfähig, für

*) Ueber die Porosität des Holzes. Arb. d. Bot. Institus in Würzburg. 1879. II. § 3.

**) Untersuchungen. III. p. 51.

***) l. c. p, 47.

†) Untersuchungen. III. p. 51.

††) Vergl. auch R. Hartig's Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Pflanzen. Berlin 1891. pp. 211 und 216.

Luft dagegen sehr wenig permeabel*) ist. Da eine Bewegung des Imbibitionswassers für unsere Zwecke nicht in Betracht kommt, mithin sämmtliches Wasser beim Verlassen einer Tracheide die Schliessmembranen passiren muss, so lässt sich die Zellanordnung des Nadelholzes in folgender Weise schematisiren. Man denke sich eine Röhre aus einer für Wasser und Luft impermeablen Substanz, in welcher in gleichen Abständen Filtrirmembranen ausgespannt sind, welche die den Schliessmembranen eigenthümlichen Fähigkeiten besitzen sollen. (Fig. 1.) Jede der so entstandenen Kammern sei zur Hälfte mit Wasser, zur Hälfte mit Luft gefüllt. Um eine durch die Schwerkraft bewirkte Wasserverschiebung zu verhindern, soll sich die Röhre in horizontaler Lage befinden.

Freilich befindet sich das Wasser und die Luft in den Tracheiden in Form einer Jaminschen Kette, welche aus aneinander gereihten Luft- und Wassersäulchen besteht. Die Annahme der Möglichkeit eines Ueberfliessens des Wassers von einer Wassersäule zur andern**) ist mit den Lehren der Physik, insbesondere mit den der Meniskenbildung zu Grunde liegenden Gesetzen völlig unvereinbar. Ueberdies ist eine Verschiebung der ganzen Jamin-schen Ketten, sobald nur der nöthige Druck zu Gebote steht, ausführbar, doch kann eine solche infolge der die Zellen trennenden, für Luft fast impermeablen Schliessmembranen nur auf geringe Strecken hin erfolgen und somit für unsere Betrachtungen vernachlässigt werden (Fig. 2). Es kann daher eingewandt werden, dass innerhalb des Holzes die Wassersäulchen überhaupt nicht communiciren, dass also obiges Schema falsch sei. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich an den radialen Tracheidenwänden in grosser Zahl Hoftüpfel befinden, welche in vielen Fällen eine continuirliche Wasserverbindung mit einer Wassersäule der benachbarten Tracheide, die ihrerseits freilich ebenfalls mit einer Jamin'schen Kette erfüllt ist, herstellen. So lässt sich bei gleichzeitiger Berücksichtigung mehrerer nebeneinander verlaufender Tracheidenreihen die Vorstellung rechtfertigen, dass alle Wassermengen des Zellsystemes durch schlangenförmig gewundene Wasserfäden (Fig. 3) in Verbindung stehen, welche in ihrem Verlaufe fortwährend an Luftblasen angrenzen. Da die Betrachtung der Aenderungen in der Wasservertheilung und den Luftspannungen in einem solchen Systeme äusserst complicirt sein würde, so wurde in der Schematisirung noch ein Schritt weiter gegangen und das obige in der Figur 1 angedeutete Schema nachstehenden Betrachtungen zu Grunde gelegt.

---

*) E. Russow, Bot. Centralblatt. 1883. XIII. p. 105.

**) Als diese Arbeit bereits druckfertig war, erschien das umfangreiche Werk Strasburgers „Ueber den Bau und die Verrichtungen der Leitungsbahnen in den Pflanzen". Ich habe noch nachträglich die dortigen Mittheilungen berücksichtigt, soweit es möglich war; eine Gleitbewegung des Wassers zwischen Tracheidenwand und Luftblase (l. c. 705) scheinen mir die Strasburger'schen Versuche noch nicht zu beweisen.

Satz 1. Vorausgesetzt wird, dass die soeben beschriebene Zellreihe auf einer Seite für Luft und Wasser verschlossen, also nur von einem Ende her zugänglich ist. Wird nun an dieser Stelle Wasser hineingepresst, so dringt es in die Zellräume in dem Maasse ein, bis dadurch der Druck der Binnenluft gleich dem Drucke ist, unter welchem das einströmende Wasser steht. Die vom Holze aufgenommene Wassermenge werde ich späterhin mit A bezeichnen.

Zusatz. Da jede Filterwand dem durchgehenden Wasser einen gewissen Widerstand entgegensetzt, so nimmt nach eingetretenem Ruhezustand in Wahrheit der Druck von Zelle zu Zelle in arithmetischer Progression ab. Wählen wir die Zellreihe genügend lang, so werden bei einem bestimmten Wasserdrucke von einer bestimmten Zelle an alle folgenden in dem intakten Zustand verbleiben.

Folgerung. Da die Absorptionsfähigkeit des Wassers für Gase mit zunehmendem Drucke wächst, so wird

1. das Wasser in den Zellen des grösseren Gasdruckes grössere Mengen Gas absorbirt haben;

2. das von Zelle zu Zelle filtrirende Wasser Luftmengen aus den zuerst passirten Zellen mit sich führen;

3. werden die Luftmengen der erstpassirten Zellen, da sie am meisten der Absorption ausgesetzt sind, am ersten durch Wasser ersetzt werden.

Satz 2. Vorausgesetzt ist die nach Satz 1 behandelte Zellreihe, in welcher nach zu Stande gekommenem Gleichgewicht völlige Ruhe herrscht.

Wird nun plötzlich der auf der offenen Seite lastende Ueberdruck beseitigt, so strömt das Zellwasser, getrieben durch den auf ihm lastenden Druck, durch die Zellreihe rückwärts, bis sämmtliches vorher eingedrungene Wasser die Zellreihe verlassen hat. Diese durch Expansion der Zellluft geförderte Menge werde ich späterhin mit a bezeichnen.

Zusatz. Infolge des Widerstandes jeder Filterwand vermag nicht alles Wasser wieder die Zellreihe zu verlassen. Nach eingetretenem Ruhezustande wird der Druck von Zelle zu Zelle um die Grösse d verschieden sein. Es kommen dabei nur die Zellen in Betracht, in denen vorher bei herrschendem Ueberdrucke Compression stattgefunden hat. In den vom Wasser zuerst passirten Zellen wird im Ruhezustande der Druck nach innen in arithmetischer Progression wachsen; die am anderen Ende der Zellreihe gelegenen Zellen sind noch völlig intakt; mithin findet sich in der Mitte der beeinflussten Zellen ein Maximum des Druckes.

Folgerung 1. War das (gemäss dem Satze 1) eingeströmte Wasser luftfrei, so wird es sich natürlich mit Luft sättigen und je nach den gegebenen Nebenumständen (Barometerdruck, Temperatur, Absorptionscoefficienten) mehr oder weniger Luft aus der Zellreihe entführen. War es jedoch vor seinem Eintritte mit Luft

gesättigt, so hat es freilich unter dem herrschenden Ueberdruck innerhalb der Zellen weitere Portionen Luft absorbirt, doch giebt es diese, falls ihm dazu genügend Zeit gelassen wird, wieder im Inneren der Zellen ab.

Folgerung 2. Bei erheblich stärkerem Ueberdrucke (etwa 2 Atmosphären) kommt der äusserst geringe Widerstand nicht mehr in Betracht. Jede im Holze befindliche Luftblase wird dann nach dem Boyle-Mariotte'schen Gesetze comprimirt; die eindringende Wassermenge ist dann gleich der Differenz der Luftvolumina vor der Compression und während dieser. Besass die Luft ursprünglich Atmosphärenspannung, so ist die eindringende Wassermenge (A) gleich der durch Dilatation wieder austretenden (a). Herrschte vorher im Inneren des Holzes eine Luftverdünnung, so ist $a < A$; es bleibt dann eine gewisse Wassermenge R im Holze. Jedenfalls ist a bei gegebenem Ueberdruck eine Funktion des Volumens der Binnenluft und ihrer Spannung.

Es bedeute p den Normaldruck einer Atmosphäre, also np ein Vielfaches davon. Da nun durch den Druck von n Atmosphären ein Luftvolumen von der ursprünglichen Spannung p (= 1) auf $\frac{1}{n}$ seines Volumens comprimirt wird, so ist, wenn V das Gesammtvolumen der Binnenluft, gemessen unter dem Drucke p, bedeutet:

$$V - \frac{V}{n} = \frac{n-1}{n} V = A.$$

Nun ist $A = a + R$; wenn die Werthe n, a und R bekannt sind, so lässt sich V berechnen.

Satz 3. In das Zellsystem, wie es Satz 1 voraussetzt, und in welchem die Binnenluft die Spannung B_0 besitzt, wird Luft von der grösseren Spannung B_1 gepresst. Diese Luftmenge wird allmählich die erste Zellwand durchdringen und das Wasser dieser Zelle (gemäss dem Satze 1) in die nächsten pressen. In die zweite Zelle wird nicht eher Luft in grösserer Menge eintreten, als bis die erste Zelle völlig wasserleer ist.

Wird die Membran der ersten Zelle verletzt, so erfolgt der Eintritt der Luft in diese und das damit verbundene Ueberfiltriren des Wassers in die nächsten Zellen fast augenblicklich.

Folgerung. Je wasserreicher die Zellen (bei der gleichen Binnenluftspannung B_0) sind, desto schneller wird der Lufteintritt erfolgen. Das Wasser nämlich, welches sich in den unverletzten Zellen befindet, vermag durch Ueberfiltriren in die benachbarten sehr leicht eindringender Luft Platz zu machen. Ist die erste Zelle völlig mit Wasser erfüllt, so macht sich die geringe Permeabilität der Zellwand für Luft nur einmal geltend, indem die Luft beim Eindringen in das Zellsystem zunächst nur eine Wand zu passiren hat. Ist dagegen bereits die erste Zelle mit Luft erfüllt, so ist dadurch der Widerstand, welchen weitere Luftmengen bei ihrem Eindringen zu überwinden haben, vergrössert.

Die mathematisch-physikalische Darstellung dieses Phaenomens ist schwierig.

Experimenteller Beweis des 3. Satzes.

„Ein feuchter Holzcylinder von mehreren Centimetern Länge wurde in die Compressionspumpe gebracht und ihm während 67 Stunden vermittelst des Ueberdruckes von 4 bis 3 Atm. Luft eingepresst. Unmittelbar nach der Herausnahme des Cylinders aus dem Compressionsrohre wurde er in der Mitte durchgeschnitten und unter Wasser gebracht. Es fand allenthalben ein lebhafter Austritt von Gasblasen statt; derselbe liess zuerst an den Halbirungsflächen nach, während die Endflächen noch etwas länger thätig waren.“ *)

Durch die eindringende Luft wurde das flüssige Wasser der Zellräume nach der Mitte des Hohlcylinders gepresst. Bei und nach dem Durchschneiden des Holzes trat das Wasser an den frischen Schnittflächen aus. Der auch an diesen Flächen erfolgte Austritt von Gasblasen liess zuerst nach, weil die dort beobachtete Luft nur den angeschnittenen Zellen entstammte. Lietzmann's Erklärung dieses Versuches beruht auf irrigen Vorstellungen über die Bewegung des Wassers und der Luft im Holze.

Satz 4. Vorausgesetzt ist die Zellreihe mit der gleichmässigen Spannung B_0. Die erste Zelle wird einer stetigen Saugung ausgesetzt. Aus Gründen, die den in Satz 3 in Betracht kommenden ähnlich sind, tritt zunächst das Wasser aus der ersten Zelle und leitet damit eine Wasserfiltration durch sämmtliche Zellen ein. Ist die Saugung stark genug, so tritt alles flüssige Wasser aus der Zellreihe, ehe ein nennenswerther Luftaustritt erfolgt.

Folgerung:

Lässt man eine an Intensität zunehmende Saugung wirken, so tritt die erste Spur Wasser in dem Augenblick aus der Zellreihe, wo die Luftverdünnung, welche thatsächlich in dem Zellsysteme vorhanden ist, um eine Spur überschritten wird.

Satz 5. Vorausgesetzt, die Zellreihe sei an ihren beiden Enden permeabel.

Es wird nun an der einen Seite Wasser hineingepresst mit dem Ueberdrucke P. Innen herrscht anfangs der gewöhnliche Luftdruck. Da die Summe der Widerstände, welche das durchfiltrirende Wasser zu überwinden hat, von Zelle zu Zelle geringer werden, so fällt auch der Ueberdruck in den Zellen in arithmetischer Progression bis auf 0 am entgegengesetzten Ende der Zellreihe. Ist dieser Gleichgewichtszustand hergestellt, so wird ein weiteres Hineinpressen von Wasser unterlassen, doch an der Stelle seines Eintrittes dem hereingepressten Wasser kein Austritt gewährt. Es

*) E. Lietzmann, Flora, 1. Aug. 1887, p. 26, Versuch 27.

strömt dann mit abnehmender Geschwindigkeit an dem andern Ende heraus.

Folgerung:

Aus der während der Einwirkung des Ueberdrucks herrschenden Druckabnahme von Zelle zu Zelle folgt, dass zumal bei schneller Filtration eine Verschiebung der Binnenluft von der Eintrittsstelle weg eintritt*).

Satz 6. Vorausgesetzt die an einem Ende geschlossene, mit Wasser und verdünnter Luft gefüllte Zellreihe. Am offenen Ende wird durch die Athmosphäre so lange eine gefärbte Flüssigkeit eingepresst, bis die Binnenluft Atmosphärenspannung angenommen hat. Diese Flüssigkeit wird das vorher in den Zellräumen vorhandene Wasser vor sich hertreiben. Schliesslich soll erkennbar sein, wieweit die Zellreihe von gefärbter Flüssigkeit erfüllt ist.

Angenommen, vor dem Versuche enthielt die Zellreihe gleiche Volumina Wasser und Luft, letztere von der Spannung $^1/_2$ Atm., so wird zum Spannungsausgleiche soviel gefärbte Flüssigkeit erforderlich sein, wie der Hälfte des ursprünglichen Luftvolumens entspricht. Die Farbstofflösung wird also $^1/_4$ der Zellreihe einnehmen.

Setzen wir dagegen den Fall, es verhält sich ursprünglich das Volumen des Wassers zur Luft wie 9:1 und die Luft besitzt die Spannung = 0, so würde doch nur $^1/_{10}$ der Zellreihe mit Farbstoff erfüllt werden. Aus dem mehr oder weniger tiefen Eindringen des Farbstoffes darf also nicht auf grössere oder geringere Luftverdünnung geschlossen werden.

Die Tiefe des Eindringens hängt ab von dem Volumen der Binnenluft und von ihrem Verdünnungsgrade.

Satz 7. Vorausgesetzt ist die Zellreihe des vorigen Satzes, doch sind jetzt beide Enden für Luft und Wasser verschlossen. Es sei nun die Wandung der mittleren Zelle durchbohrt und in die Oeffnung luftdicht ein mit Wasser gefülltes Röhrchen eingefügt, auf dessen offenes Ende die Atmosphäre drückt.

Wenn nun die angebohrte Zelle allein saugte, so würde sie sich mit allmälig abnehmender Intensität mit Wasser füllen, bis ihre Binnenluft Atmosphärenspannung besässe. Nun betheiligen sich aber gleichzeitig an der Saugung die benachbarten, noch unverletzten Zellräume; je grösser dann die Luftmenge und ihre Verdünnung, und je kleiner die Einflussöffnung ist, desto gleichmässiger wird der Saugungsprozess verlaufen.

II. Methode der Untersuchung.

Wenn man von einer Porosität des frischen Holzes spricht, so denkt man vor allen Dingen an seine bekannte Fähigkeit,

*) Vergl. Ber. d. Deutsch. Bot. Ges. 1889, VII., p. 14 und Kap. VII. Auf p. 18 daselbst Zeile 14 lies v_2 statt v_n.

Wasser aufsaugen zu können. Es ist jedoch zu beachten, dass man es hier gewöhnlich — und beim Nadelholze stets — mit einer Erscheinung zu thun hat, welche mit der Porosität eines Lampendochtes oder eines Stückes Kreide nur äusserliche Aehnlichkeit hat; während bei derartigen porösen Körpern das Wasser durch Capillarität gehoben wird, spielt diese Kraft im Holzkörper nur eine ganz unbedeutende Rolle und kann für unsere Betrachtungen gänzlich vernachlässigt werden. „Die Einsaugung von Wasser in frisches Holz ist eben nichts als die Hineinpressung desselben durch den äusseren Luftdruck, welche solange sattfindet, bis die in den Holzzellen enthaltenen Luftblasen diesem das Gleichgewicht halten.“ *)

Bei dem Versuche, die Höhe der Binnenluftspannung in frischem Tannenholze zu bestimmen, erschien es mir möglich, mit Hilfe dieser Fähigkeit des Holzes, bis zu einer erfolgenden Sättigung Wasser aufzunehmen, zu dem gewünschten Ziele zu gelangen. Zu diesem Zwecke wäre zunächst erforderlich, frisches Holz zu wägen und es darauf in Wasser zu bringen, um ihm die Möglichkeit zu geben, durch Wasseraufnahme die Spannung seiner Binnenluft mit der Spannung der Atmosphäre auszugleichen. Nach vollendeter Saugung würde eine zweite Wägung die Menge, also auch das Volumen des eingedrungenen Wassers erkennen lassen, eine Grösse, welche identisch ist mit der Verkleinerung des Volumens der Binnenluft. Wenn nun auch zunächst von diesem Luftvolumen nur das eine bekannt ist, dass es nach erfolgter Sättigung des Holzes Atmosphärenspannung besitzt, während sich aus obiger Gewichtszunahme nichts über die Luftmenge resp. über die Grösse ihres Volumens aussagen lässt, so gelingt es doch mit Hilfe verschiedener Methoden, den Luftraum im Holze zu bestimmen. Es erreichte dies Sachs vermittelst seines Dörrverfahrens, welches darin besteht, einem Holzstücke von bekanntem Volumen und Gewicht durch stundenlanges Dörren sämmtliches Wasser zu entziehen und aus dem dadurch herbeigeführten Gewichtsverluste mit Berücksichtigung des specifischen Gewichtes der Holzart und der Grösse ihres Imbibitionsvermögens das Volumen der Holzsubstanz und des Wassers zu berechnen. Wenn nun erst auf diesem oder einem andern Wege die Luftmenge, gemessen bei Atmosphärenspannung, bekannt ist, so ergibt sich durch Addition des zuerst (durch die Waage) bestimmten Wasservolumens das Volumen, welches die Binnenluft im verdünnten Zustande eingenommen hatte.

Bei der Prüfung der Methode auf ihre Anwendbarkeit zeigte sich aber ein grosser Uebelstand. In den hydromechanischen Sätzen habe ich mehrfach auf den Einfluss des Widerstandes der Filterwände auf die Wasservertheilung hingewiesen. Die Methode setzt nun voraus, dass der durch die Atmosphäre ausgeübte Druck so bedeutend sei, dass im Verhältnisse zu diesem die Widerstände, welche das Wasser zu überwinden hat,

*) Sachs, Physiologie 1887, p. 320.

gänzlich vernachlässigt werden dürfen. Das liquide Wasser im Holze müsste eine solche Beweglichkeit besitzen, dass es mit Leichtigkeit jede Spannungsverschiedenheit der Auftblasen auszugleichen und infolge dessen dem von der Atmosphäre eingepressten Wasser schnell Platz zu machen im Stande wäre. Dass diese Forderung nicht erfüllt ist, hat Schwendener*) durch den Versuch gezeigt, indem er eine durchbohrte Metallspitze in einen Kiefernstamm luftdicht einsetzte und trotz der Anwendung einer Quecksilbersäule von 600 mm in einer Stunde nur 4—6 ccm Wasser in den Stamm zu pressen vermochte. Auch eine Reihe von Versuchen, bei denen ich die Wasseraufnahme des frischen Holzes, also den Vorgang der Saugung, genauer beobachtete, führte zu dem Ergebnisse, dass die vollständige Sättigung selbst kleiner Holzstücke eine so lange Zeit erfordert, dass dadurch aus andern Gründen diese Methode unbrauchbar wird. Es gelang aber, die Schwierigkeit zu umgehen.

Gemäss der oben (Satz 2, Folg. 2) ausgesprochenen Betrachtungen bleibt in frischem Holze, dessen Binnenluft verdünnt ist, nach einer durch Wassereinpressung ausgeführten Compression derselben nur soviel Wasser zurück, als erforderlich ist, die Binnenluft auf Atmosphärenspannung zu comprimiren. Experimentell liese sich dies nun in der Weise ausführen, dass frisches Holz nach der Bestimmung seines absoluten Gewichtes in ein Gefäss mit Wasser gebracht und auf dieses eine gewisse Zeit hindurch ein Ueberdruck von mehreren Atmosphären ausgeübt wird. Nach Aufhebung dieses Druckes würde man nun abzuwarten haben, bis die comprimirte Binnenluft sich wieder auf Atmosphärenspannung ausgedehnt und dabei alles überschüssige Wasser aus dem Holze getrieben hätte. Durch eine zweite Wägung liesse sich nun die im Holze verbliebene Wassermenge bestimmen. Es gelang nun, diese zur Erzielung der Sättigung des Holzes ausgeführte Compression seiner Binnenluft in der Weise auszunutzen, dass die Anwendung des Sachs'schen Dörrverfahrens, dessen Umständlichkeit und Kostspieligkeit R. Hartig in seinen „Untersuchungen II“ (p. 13) beklagt, gänzlich vermieden wurde. Ich erreichte dies durch die Messung der Wassermenge, die nach Aufhebung des Ueberdruckes das Holz verliess; dass dieses Wasservolumen eine Funktion des Volumens der Binnenluft und des Grades der angewandten Compression sei, habe ich bereits in den einleitenden Betrachtungen in dem Satze 2 Folg. 2 auseinander gesetzt.

Wie nun die so ermittelten Werthe mit Hilfe der von Sachs und R. Hartig mitgetheilten Rechenmethoden verwerthet wurden, wird sich am besten an einem Beispiele verdeutlichen lassen.

Am 15. August 1890, Morgens 9 Uhr, wurde eine 17 m hohe Tanne gefällt und ein etwa 2 m vom Gipfel entferntes Stammstück zum Versuche gewählt.

*) Untersuchungen über das Saftsteigen, Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin, 1886, p. 580.

A. Die Höhe des Holzcylinders betrug etwa 6 cm, sein Durchmesser nach der Schälung 2,5 cm. In diesem Falle musste das Holz mitten durch gespalten und mit dem Hohlmeisel von der Markröhre befreit werden.

B. Sein Frischgewicht betrug $b = 28{,}297$ gr.

C. Darauf wurde das Holz in Wasser gebracht und auf dieses eine Minute lang ein Ueberdruck von 2 Atm. ausgeübt. Infolge dessen trat eine zunächst unbestimmte Wassermenge in das Holz und comprimirte die Binnenluft.

D. Nach Aufhebung des Druckes strömte aus dem Holze die Wassermenge $a = 1{,}374$ gr.

E. Nachdem das Holz aus dem Wasser genommen und von adhaerirendem Wasser befreit war, wog es 31,405 gr. Mithin hatte es zurückbehalten die Wassermenge $e = 3{,}108$ gr.

F. Zur Compression der unbekannten Binnenluftmenge v (gemessen bei Atmosphärendruck) durch den Ueberdruck von 2 Atm., also auf $^1/_3$ ihres Volumens, war erforderlich die Wassermenge $d = 1{,}374$ gr, mithin ist:

$$v = 1{,}374 \,.\, {}^3/_2 \text{ ccm} = 2{,}061 \text{ ccm}.$$

G. Nach dem Gesetze von Boyle (Mariotte) verhält sich das Volumen der in frischem Holze befindlichen Binnenluft $(e + v)$ zum Volumen der auf Atmosphärendruck comprimirten Binnenluft (v) umgekehrt wie die entsprechenden Drucke.

$$\text{Also } \frac{e+v}{v} = \frac{5{,}169}{2{,}061} = \frac{700}{y}, \text{ woraus sich ergibt}$$

$y = 278{,}97$ mm Quecksilber oder 0,398 Atm. bei einem Barometerstande von 700 mm.

H. Das Volumen des Holzes betrug $h = 29{,}30$ ccm.

I. Da das Luftvolumen im frischen Holze $(e + v)$ 5,169 ccm betrug, so nahm es 17,64 % des Gesammtvolumens ein.

K. Das Gesammtvolumen (h) vermindert um das Volumen der Binnenluft $(e + v)$ ergibt das vom Wasser und von der Holzsubstanz eingenommene Volumen V. Das Volumen des Wassers sei X, das des Holzes = Y, die dazu gehörigen specifischen Gewichte $m = 1$ und $n = 1{,}56$; dann ergeben sich die Gleichungen

$$X + Y = V = 24{,}121 \text{ ccm Wasser} \quad \ldots \quad 1)$$
$$mX + nY = b = 28{,}297 \text{ gr oder ccm Wasser} \quad 2)$$

$$X = \frac{nV - b}{n - m} = \frac{37{,}63 - 28{,}30}{0{,}56} = 16{,}67 \text{ ccm Wasser};$$

$$Y = \frac{b - mV}{n - m} = \frac{28{,}30 - 24{,}13}{0{,}56} = 7{,}45 \text{ ccm Holz}; \text{ oder}$$

letzteres Resultat einfacher durch Einsetzen von X in die erste Gleichung

$$Y = V - X = 7{,}45 \text{ ccm}.$$

Diese Mengen von Holz und Wasser werden nun als

Volumenprocente des frischen Holzes berechnet und ergeben:

$$X = \frac{16{,}67 \,.\, 100}{29{,}30} = 56{,}87\,\%\ \text{Wasser.}$$

$$Y = \frac{7{,}45 \,.\, 100}{29{,}30} = 25{,}41\,\%\ \text{Holz.}$$

L. Nach den Berechnungen von Sachs und R. Hartig imbibirt die Holzsubstanz der Tanne genau 0,5 ihres Volumens. Mithin waren von obiger Wassermenge

$$\frac{25{,}41\,\%}{2} = 12{,}70\,\%\ \text{imbibirt.}$$

M. Die Binnenluft des untersuchten Stammstückes aus dem Gipfel besass also eine Spannung von

278,97 mm Qu. oder 0,398 Atm.

Die Analyse von 100 Raumtheilen des frischen Holzes ergab:

An imbibirter Holzsubstanz	38,11
an flüssigem Wasser in den Zelllumina	44,17
an verdünnter Luft	17,64
	99,92.

Diese Mittheilung sollte nur den Zweck haben, den Gang der Methode in grossen Zügen zu veranschaulichen, während ich eine eingehende Besprechung der einzelnen Phasen der Methode und eine Prüfung auf Fehlerquellen in einzelnen Zusätzen später anfügen werde, um sogleich auf die Resultate, die ich auf diesem Wege erzielt habe, eingehen zu können.

Im soeben mitgetheilten Falle betrug die Spannung der Binnenluft etwa 0,4 Atm., ein Werth, den ich öfters bei Gipfelholz beobachtete. Doch lege ich auf derartige Untersuchungsergebnisse kein Gewicht, da bekanntlich an den Orten der Transpiration der Wasserverbrauch oft ein so rapider ist, dass dadurch nahezu luftleere Räume in der Pflanze entstehen können. Solche Bestimmungen erhalten erst dann einen Werth, wenn zugleich Angaben über die Spannungsverhältnisse der Binnenluft aus andern Höhen desselben Stammes vorliegen. Derartige Zahlenreihen, welche sich auf die Verschiedenheiten der Gasspannung in senkrecht übereinander gelegenen Holzpartien beziehen, würden jedenfalls ein brauchbares Material für den Aufbau einer Theorie des Saftsteigens abgeben. Betreffs der Consequenzen einer gründlichen Kenntniss der Binnenluftspannung möchte ich mich zunächst mit dem Hinweis begnügen, dass dadurch die Tragweite der von der Krone ausgehenden Saugung erkannt wird; es würde dadurch entschieden werden, ob dieser Kraftquelle die Bedeutung zukommt, welche ihr eine Reihe von Forschern zuerkannt haben.

Auf Grund dieser Erwägungen wählte ich zum Versuche eine 19,5 m hohe Edeltanne (*Abies pectinata* D. C.). Sie stand in moorigem Waldboden, 540 m über dem Meeresspiegel, beim Kochelfall im Riesengebirge. Gefällt wurde sie am 28. August 1890, 7 Uhr

30 Min. früh. Dem Wetterberichte*) dieses und der vorhergehenden Tage entnehme ich folgende Angaben:

1890.	Barometer auf 0 red.			Temp. Cels.			Feuchtigkeit rel.	
August	7a	2p	9p	7a	2p	9p		
25.	697.7	697.4	697.4	13.4	15.9	10.3	83,3%	Bewölkt.
26.	697.5	698.3	699.0	7.4	9.5	10.8	89,0%	„
27.	700.6	699.9	697.9	10.2	16.9	16.5	66,0%	„
28.	701.6	703.6	704.7	11.0	15.4	8.8	70,0%	Schw.Bew.

Nach der Fällung wurde der Stamm zum Transport in 4 m lange Stücke zersägt, aus denen nach 45 Min. mit der Kreissäge Meterholz geschnitten wurde. Von allen diesen Stücken wurde das unterste Decimeter abgesägt und aus dessen jüngstem Splinte der zur Spannungsbestimmung erforderliche Holzcylinder herausgespalten; die übrigbleibenden 90 cm langen Stammtheile wurden zu einer andern Untersuchung verwandt. Bei der Herstellung der Cylinder wurde sorgsam darauf geachtet, dass alle im lebenden Stamme senkrecht übereinander orientirt waren. Die numerischen Resultate habe ich in nachstehender Tabelle zusammen gestellt, welche sich in ihrer Anordnung völlig an das oben mitgetheilte Beispiel anschliesst und daher ohne weiteres verständlich sein wird.

	B	H	E	D	F	G	K		I
Aus der Stammhöhe. m	Abs. Gewicht des frischen Holzes	Volumen des gesättigten Holzes.	Gewichtszunahme in Folge der Sättigung.	Corrigirte Ausflussmenge a	Volumen der Tracheidenluft unter 700 mm.	Tension der Tracheidenluft in mm.	100 Teile Splintholz enthalten		
							imbib. Subst.	Wasser	Luft
18	33,745	32,60	1,580	0,950	1,425	331,9	34,1	56,7	9,22
17	25,540	25,20	0,810	1,265	1,897	490,5	32,4	56,9	10,74
16	25,410	25,35	0,725	1,340	2,010	514,4	29,5	59.7	10,79
15	30,705	29,90	0,445	1,185	1,777	559,8	27,1	65,5	7,43
14	29,020	27,55	0,365	1,235	1,852	584,7	35,8	56,1	8,05
13	26,370	25,30	0,290	1,110	1,665	595,6	32,0	60,3	7,73
12	24,560	23,10	0,375	0,840	1,260	539,4	35,7	57,2	7,08
11	27,185	25,57	0,430	0,785	1,177	512,7	33,7	60 0	6,28
10	29,575	27,95	0,430	0,930	1,395	535,1	33,2	60,3	6,52
Krone									
9	26,835	25,60	0,360	0,920	1,380	555,2	31,0	62,2	6,80
8	29,665	28,50	0,490	1,015	1,522	529,5	29,8	63,1	7,06
7	30,140	28,90	0,525	1,070	1,605	527,5	31,2	61,5	7,34
6	31,470	30,35	0,440	1,255	1,882	567,4	30,4	62,0	7,65
5	29,735	28,25	0,470	1,010	1,515	534,3	32,8	60,2	7,03
4	29,220	27,70	0,325	0,845	1,267	557,1	30,0	64,3	5,75
3	28,605	27,00	0,425	0,770	1,155	511,7	31,5	62,7	5,84
2	31,490	29,50	0,370	0,950	1,425	555,7	34,3	59,6	6,08
1	26,875	24,65	0,405	0,725	1,087	510,0	40,3	53,7	6,05
0	25,080	23,60	0,575	0,930	1,395	495,7	39,0	62,7	8,35

Um zunächst diese Resultate mit einigen der sogenannten Wasserleitungstheorien zu vergleichen, möchte ich auf Spalte G hinweisen. Die dort mitgetheilten Luftdrucke liegen, wenn wir vom ersten absehen, zwischen den Grössen 490,5 und 595,6, ohne

*) Die meteorologischen Beobachtungen verdanke ich Herrn Hauptlehrer Winkler in Schreibershau (650 m ü. d. M.).

dass irgend eine Beziehung zu den Stammhöhen, in welchen die einzelnen Werthe beobachtet sind, existirt. Es sprechen also die Beobachtungen gegen die Richtigkeit der Vorstellungen, auf denen R. Hartig seine Saugtheorie aufzubauen versuchte. Ihre Unzulänglichkeit ist nun zwar auf Grund physikalischer Betrachtungen schon durch mehrere kritische Arbeiten dargelegt worden; doch hat Godlewski den Versuch gemacht, durch Combination des R. Hartig'schen Grundgedankens mit Vorstellungen von Nägeli und Schwendener*) und Russow**) betreffs einer saug- und druckpumpenartigen Markstrahlfunction die Wasserhebung in den Gipfel höherer Bäume zu erklären, indem nämlich die Markstrahlen das Wasser infolge eines nach oben abnehmenden Gasdruckes aus tiefergelegenen Tracheïden schöpfen und in höhergelegene abgeben sollen. Auf die Unwahrscheinlichkeit dieser Vorstellung hat bereits Schwendener hingewiesen, da ein Markstrahlturgor von 12 Atmosphären wohl unempfindlich sein möchte gegen so äusserst geringe Druckunterschiede, wie sie gemäss der R. Hartig'schen Vorstellung in zwei übereinander gelegenen Tracheïden vorhanden sein sollen; nach meinen Spannungsbeobachtungen scheint diese von Godlewski benutzte Hilfsquelle sich als illusorisch zu erweisen.

Die Resultate stehen aber auch in Widerspruch mit den Schlussfolgerungen, welche sich aus der J. Böhm'schen Capillartheorie ergeben würden. Es mag betreffs dieser der Hinweis genügen, dass auch in Capillarsystemen, wie sie sich jener Forscher denkt, ein nach oben abnehmender hydrostatischer Druck vorhanden ist.

Ergiebiger sind die Resultate in einer andern Hinsicht. Bei der Betrachtung je zweier benachbarten Werthe ergeben sich ganz erhebliche Spannungsdifferenzen, deren Höhe noch bedeutend mehr bei der Umrechnung in Wasserdruck hervortritt; so übertraf z. B. der Druck in der Stammeshöhe von 13 m den einen Meter tiefer beobachteten um 76 cm Wasserdruck. Anfangs trug ich kein Bedenken, derartige Beobachtungen ohne Weiteres für falsch zu erklären; sie schienen mit den Erfahrungen, welche von fast allen Forschern, die sich mit der Frage nach der Wasserbewegung beschäftigt haben, aus mannigfaltigen und einwurfsfreien Versuchen gewonnen sind, im Widerspruch zu stehen. Schon im Jahre 1853 hatte Th. Hartig***) durch sein bekanntes Tropfenexperiment die Aufmerksamkeit auf die grosse Filtrationsfähigkeit des frischen, saftreichen Holzes gelenkt. Durch falsche Interpretation des Versuches ist nun aber, wie Godlewski†) überzeugend nachgewiesen hat, jene Fähigkeit des Holzes erheblich überschätzt worden. Die erste annähernd richtige Bestimmung der Grösse des Filtrationswiderstandes wurde von Schwendener*) ausgeführt, indem es

*) „Das Mikroskop" 1877, 2. Aufl., p. 382.
**) l. c. p. 144.
***) Bot. Zeitung 1853, p. 311.
†) Pringsheims Jahrb. XV. p. 589, vgl. auch Janses-Arbeit in demselben Jahrb. XVIII. p. 45 ff.

ihm mit Hilfe einer 12 cm hohen Wassersäule gelang, das Wassernetz in einem 1 m langen Holzstück zu verschieben.

Dass nun gleichwohl, den bisherigen Annahmen entgegen, zuweilen im Stamme ganz erhebliche Druckdifferenzen in benachbarten Holzpartien zu Stande kommen können, ist mir aus einer Reihe von Versuchen, welche ich jetzt mittheilen will, wahrscheinlich.

III. Ueber die Beweglichkeit des liquiden Wassers im Splintholze.

Die zahlreichen Versuche, welche schon seit geraumer Zeit in der Pflanzenphysiologie zum Studium der Saftbewegung im Holze angestellt worden sind, demonstriren fast durchweg nur die Beweglichkeit oder Filtrationsfähigkeit des in den Tracheïden und Gefässen enthaltenen flüssigen Wassers, während über die Bewegung des von den Holzwänden imbibirten Wassers ausser den Beobachtungen Wiesners nichts bekannt sein dürfte. Die Filtrationsversuche lieferten nun das Resultat, dass bei frischem, jungen und wasserreichem Splintholze nur äusserst geringe Druckkräfte erforderlich sind, um das in ihm enthaltene Wassernetz zu verschieben.

Dennoch könnte man bezweifeln, dass diese Versuche zum Verständniss des Vorganges der Wasserbewegung im lebenden Baume beitragen; es lassen sich folgende Bedenken gegen ihre Beweiskraft geltend machen:

Während in der lebenden Pflanze in den jüngeren Jahresringen möglicher Weise andre quantitative Verhältnisse wirksam sind als im älteren Splintholze,**) üben wir bei Filtrationsversuchen auf die ganze Reihe der verwandten Splintholzringe die gleichen Druckkräfte aus. Ausserdem ist mehrfach darauf hingewiesen worden, dass bei dem Saftsteigen den lebenden Elementen des Holzkörpers auch eine Rolle zufallen müsse; auf diesen Umstand können Filtrationsversuche in keiner Weise Rücksicht nehmen, da der Filtrationsstrom die lebenden Zellen sicherlich umgeht. Ferner ist bekanntlich sehr lufthaltiges Holz wenig geeignet für Filtrationsversuche. Nehmen wir nun an, es habe ein Baum bei lebhafter Transpiration seinem jüngsten Jahresringe grosse Mengen Wasser entzogen, so dass in dieser Zone grössere Lufträume entstanden sind, während die älteren Jahresringe noch sehr wasserreich sind. Filtrationsversuche, welche nun mit diesem Holze angestellt werden, liefern zweifellos das Resultat, dass die älteren Jahresringe filtrationsfähiger sind. Trotzdem waren sie in diesem Falle an der Wasserversorgung der transpirirenden Flächen unbetheiligt. Man ersieht daraus, dass die so ermittelte „Filtrationsfähigkeit“ nur ein physikalischer, aber kein physiologischer Begriff ist.

In dem Bedenken gegen die Beweiskraft der Filtrationsversuche wird man noch durch Beobachtungen bestärkt, welche mit

*) „Saftsteigen“, l. c., p. 579.
**) von Höhnel, Pringsh. Jahrb. XII, p. 128.
A. Wieler, Pringsh. Jahrb. XVIII, p. 114.
R. Hartig, Ber. d. deutsch. bot. Ges. VI, p. 222.

der Lehre von der grossen Beweglichkeit des Wassers im Widerspruch stehen, nämlich durch das Verhalten frischen Holzes im Wasser. Bei der Verdünnung der Binnenluft im Splintholze müsste man doch erwarten, dass es der Atmosphäre ein Leichtes sei, durch Einpressung von Wasser in kurzer Zeit die Binnenluft auf Atmosphärendruck zu comprimiren.

R. Hartig, der bei seinen Holzanalysen ganz erhebliche Mengen von frischem Holze behufs einer Volumetrirung desselben in Wasser brachte, theilt nun zur Rechtfertigung seiner Methode mit, dass der durch Einsaugung verursachte Fehler nur gegen 0,5% betrug..

Ein grosser Theil dieser eingesaugten Wassermenge ist aber sicherlich nicht in das Innere der Holzstücke gelangt, sondern capillar in die angeschnittenen und deshalb*) vor dem Eintauchen in Wasser mit Luft gefüllten Tracheïden eingedrungen, so dass in Wahrheit die zur Compression der Binnenluft verwandte Wassermenge noch geringer ist und vermuthlich nur 0,25% betragen dürfte (cfr. p. 39).

Die Kenntniss jener Zustände, welche die Einsaugung des Wassers in so hohem Grade erschweren, ist jedenfalls für das Verständniss der Wasserbewegung im Holze von Bedeutung. Ich werde daher im Folgenden die hauptsächlichsten Versuche, welche ich zum Studium dieses Phaenomenes angestellt habe, darlegen und dessen vermuthliche Ursachen zu ergründen suchen.

Unter den Versuchen, welche zur Ermittelung der Saugungsintensität lebenden Stammholzes gemacht worden sind, nehmen die zahlreichen und gründlichen Beobachtungen Th. Hartigs die erste Stelle ein. Leider war damals die Fragestellung und daher auch die Beobachtungsweise eine andere, so dass jenes Material für unsere Zwecke wenig zu verwenden ist. Denn einerseits ist die mit Hilfe eines offenen und mit Wasser gefüllten Manometers ermittelte Saugungsintensität von Zufälligkeiten bei der Anfertigung des Bohrloches und der Befestigung des Apparates abhängig und infolge dessen kann eine Vergleichung zweier Manometer keine einwurfsfreien Resultate liefern, anderseits leiden alle manometrischen Beobachtungen an dem Uebelstande, dass wir über die Grösse des Holzvolumens, welches auf das Manometer Einfluss ausübt, gänzlich im Unklaren sind.

Es erschien mir daher zweckmässig, kleine Holzstücke von bestimmtem Volumen in Wasser zu bringen und zu beobachten, wieviel Zeit zur Einsaugung einer bestimmten Wassermenge erforderlich ist und nach welchem Gesetze die Sättigung erfolgt.

Versuch 1. Am 22. August 1890, 10 Uhr Vorm., wurde eine Tanne mit unterem Stammdurchmesser von 12 cm gefällt. 35 Minuten später brachte ich ein 39 cm langes Stück vom unteren Theil des Stammes senkrecht in eine tubulirte Glasglocke (Fig. 5, doch nur die Theile bb und cc), nachdem zuvor neue Schnittflächen hergestellt waren. Das Innere der Glocke communicirte mit einem

*) cfr. p. 10, Satz. 3.

Wasserrevoir, dessen Niveau in gleicher Höhe mit der Mitte des betreffenden Holzstückes stand. Die Menge des aus diesem Gefässe verbrauchten Wassers wurde mit Berücksichtigung eines Beobachtungsfehlers von $\pm$ 0,025 ccm gemessen. Zunächst strömte aus der Glocke Wasser, indem die in den angeschnittenen Tracheïden der Schnittflächen durch capillares Eindringen des Wassers anfangs comprimirte Binnenluft den Ausweg fand und bei ihrer Ausdehnung auf Barometerspannung Wasser verdrängte. Erst nach 14 Minuten war eine Saugung bemerkbar und es wurde mit der Messung des eindringenden Wassers begonnen. Da zur Aufnahme des ersten Cubikcentimeters 11 Min. erforderlich waren, so wurde fernerhin die Aufsaugung von 0,5 ccm beobachtet. Es wurden folgende Zeiten in Minuten und Secunden notirt:

5^{10}, 4^{45}, 7^{30}, 7^{5}, 6^{30}, 6^{10}, 5^{30}, 6^{15}, 6^{40}, 7^{30}, 8^{50}, 9^{35}, 9^{50}, 11^{5}, 11^{20}, 13^{45}, 12^{40}, 14^{30}, 16^{0}, 14^{5}, 18^{20}, 20, 20, 22, 21, 25, 32, 46, 71, 67, 61, 59, 55, 46, 45.

In etwa 13 Stunden wurden also 18,5 ccm aufgenommen bei einem Holzvolumen von 39.36 π = 4410 ccm, wobei allerdings nur das Splintholz in Betracht kommen kann. Während der Beobachtungszeit ist nun nach einigen Schwankungen die Intensität der Saugkraft nur auf $^1/_{10}$ gesunken; aus den Zahlen geht deutlich hervor, dass zu einer vollständigen Sättigung eine bedeutend längere Zeit erforderlich gewesen wäre.

Aehnliche Versuche, welche mit kleineren Holzstücken und 3 cm dicken Holzscheiben angestellt wurden, ergaben im Wesentlichen dasselbe Resultat. Es zeigte sich bei der Ausdehnung der Beobachtung auf mehrere Tage ein Abnehmen der Intensität, doch sind die den Zahlenreihen zu Grunde liegenden Gesetze keineswegs so einfach, dass man aus den Beobachtungen einen Schluss auf das Ende der Saugung machen könnte.

Fragen wir nun nach dem Sitze und der Beschaffenheit der Hindernisse für einen schnellen Wassereintritt in das Holz, so liegt es am nächsten, nach anatomischen Ursachen zu suchen. R. Hartig äussert nun bei der Besprechung seiner Untersuchungen an abgesägten Stämmen gelegentlich die Ansicht, dass ein reichlicher Lufteintritt in die Schnittflächen infolge der durch den Atmosphärendruck erfolgenden Schliessung der behöften Tüpfel unmöglich gemacht werde. Nach der Construction dieser Poren wäre es, wie Russow überzeugend gezeigt hat, sehr wohl möglich, dass bei der Verletzung einer Tracheïde die Tori der Schliesshäute, welche an unverletzte, also noch verdünnte Luft enthaltende Zellen grenzen, durch den Ueberdruck der Atmosphäre dicht an die eine der Tüpfelwände gepresst werden und dadurch die Hoftüpfel für Luft und Wasser verschliessen. Da nun die einzelnen Schliessmembranen bezüglich des Grades ihrer Elasticität sehr verschieden zu sein scheinen, so könnte zur Verschliessung einzelner Hoftüpfel der in diesem Falle wirksame Ueberdruck nicht genügt haben; an diesen vereinzelten Stellen könnten die geringen Wassermengen eingedrungen und so die Erscheinung zu Stande gekommen sein, die im vorigen Versuche beschrieben wurde.

Nach dieser Vorstellung könnte also das Wasser im Holze wirklich so beweglich sein, wie es nach den Filtrationsversuchen zu sein scheint; weil nun aber, könnte man weiter folgern, infolge des Tüpfelverschlusses nicht die genügenden Wassermengen in das Holz eindringen können, kommt die grosse Beweglichkeit des Binnenwassers nicht zur Geltung.

Für diese Ansicht spricht folgender, mit frischem Gipfelholze ausgeführter Versuch.

Versuch 2. Ein Stammquerschnitt von 16 cm Länge und 4,5 cm Dicke wurde entrindet und unter Wasser in zwei luftdicht aneinander schliessende Glasglocken eingefügt. In dem Tubus der einen befand sich rechtwinklig zur Längsaxe der Glocken eine in 0,02 ccm getheilte Bürette (Fig. 5, aaaa). Darauf wurde der mit Wasser völlig gefüllte Apparat horizontal gelegt und die Saugungsintensität des Holzes beobachtet. Es wurden je 0,02 ccm aufgenommen nach:

sec: 23, 22, 25, 21, 19, 25, 25, 23, 26, 17, 24, 26, 32, 29, 36, 27, 28, 28, 33, 30, 27, 38, 45, 27, 35, 30, 33, mit einem Beobachtungsfehler von ± 1 Sec., also in Summa 0,54 ccm in 12 Min. 41 Sec.

Jetzt wurde der Apparat eine Minute hindurch aufgerichtet; es lastete nun auf der oberen Holzfläche ein Wasserdruck von 7, auf der unteren von 23 cm. In dieser Zeit wurden 0,05 ccm aufgenommen, von denen jedoch nach erfolgter Horizontallegung wiederum 0,04 ccm austraten.

Diese letztere Menge ist also nicht einmal in die Tiefe des Holzkörpers geströmt, sondern nur dazu verwandt worden, dem Wasser leicht zugängliche, in den äussersten Holzschichten befindliche Binnenluftmengen, welche schon Atmosphärenspannung angenommen hatten, zu comprimiren. Gemäss der im Anfang des Versuches ermittelten Saugungsintensität hätten nun aber mindestens gegen 0,05 ccm aufgenommen werden müssen. Statt dessen ist aber während des Aufrichtens nur 0,01 ccm eingedrungen und nach erfolgter Horizontallegung waren zur Aufnahme der gleichen Wassermenge 5 Min. 38 Sec. erforderlich. Kurz darauf wuchs nun die Intensität der Saugung zusehends. Es wurden gesaugt 0,02 ccm in

107, 68, 136, 12, 50, 71, 59, 55, 45, 56, 57 Sec.

Wenn schon die während des Aufrichtens eingestellte Saugung auf einen Tüpfelverschluss hindeutet, so erinnert das zuletzt beobachtete Wachsen der Saugungsintensität lebhaft an die von mir*) beschriebene Wiederkehr der Filtrationsfähigkeit, welche sicherlich von der nach Aufhebung der hohen Drucke allmählich erfolgenden Oeffnung der Holztüpfel herrührt.

Bei der Anwendung stärkerer Ueberdrucke ist nun freilich das Verhalten des Holzes ein anderes. Zur Untersuchung dieser Frage gab ich dem Apparate eine dem Örsted'schen

*) „Zur Frage der Verschlussfähigkeit der Holztüpfel im Splintholze der Coniferen". (Ber. d. Deutsch. Bot. Ges., Band VII, 1889, p. 15.)

Piëzometer ähnliche Form; die im vorigen Versuche beschriebenen Glocken (Fig. 5) wurden in vertikaler Stellung in der grossen Compressionsglocke des ersten Versuches eingeschlossen, wodurch der Ueberdruck bis auf 10 cm Quecksilber gesteigert werden konnte. Eine in der Bürette befindliche Luftblase liess die Menge des in das Holz gedrungenen Wassers erkennen. Während ich erwartet hatte, es würde sich unter der Einwirkung dieses Ueberdrucks die im vorigen Versuche beobachtete Intensitätsverminderung in erhöhtem Maasse geltend machen, ergab der Versuch, dass erhebliche Mengen in das Holz drangen und nach Herstellung des normalen Druckes darin verblieben.*)

Es liesse sich allerdings geltend machen, dass ein solches Verhalten des Holzes aus dem Vorhandensein einiger unverschlossener Holztüpfel, welche bei erhöhtem Ueberdrucke natürlich der Druckerhöhung proportionale Wassermengen durchlassen, sehr gut erklärlich ist; es gelingt jedoch durch einen andern Versuch, den Beweis zu liefern, dass die Annahme eines Hoftüpfelverschlusses die Schwierigkeit der Bewegung des Binnenwassers, also auch das Phaenomen der Saugverzögerung nicht zu erklären vermag.

In der Folgerung aus dem 4. Satze der hydromechanischen Betrachtungen habe ich darauf hingewiesen, dass eine Reihe von Tracheïden, in denen sich neben verdünnter Binnenluft ein leicht verschiebbares Wassernetz befindet, in dem Momente Wasser ausfliessen lässt, wo der äussere auf dem Tracheïdensystem lastende Luftdruck geringer wird als der Druck der Binnenluft. Rechnen wir nun mit der Vorstellung, es würden durch den Atmosphärendruck die Hoftüpfel in den äussersten Tracheïden nach innen verschlossen, so wäre freilich dadurch ein Eindringen von Luft und Wasser unmöglich gemacht, einem aus dem Zellinnern erfolgenden Wasseraustritte steht aber nichts im Wege.**)

Zur experimentellen Prüfung dieser Ansicht fertigte ich am 17. Sept. 1890, Mittags, in der Höhe von 9,5 m in einer Edeltanne von etwa 20 m Höhe vermittelst des Centrumbohrers ein Bohrloch an und setzte dessen innere Wandung mit dem Recipienten

*) In den Zusätzen zu meiner Methode der Spannungsbestimmungen habe ich (p. 41) ausführlicher mitgetheilt, wie sich bei etwa 30 ccm grossen Holzstücken unter dem Ueberdruck von 2 Atm. in wenigen Minuten das in das jüngere Splintholz eintretende Wasser nach allen Richtungen hin Bahn bricht und nach Beseitigung der Widerstände in seinen Bewegungen den oben erörterten Gesetzen unterworfen ist. Bei älterem Splintholze scheint die Anwendung der Methode unmöglich zu sein, da das Holz in Folge seines Luftreichthums für Wasser sehr schwer zugänglich ist

**) Es liesse sich zwar einwenden, dass letzterer durch einen entgegengesetzten Verschluss derselben Hoftüpfel verhindert werden könnte, doch bei der grossen Filtrationsfähigkeit der einzelnen Filtrirmembranen für das Wasser — welche wohl zu unterscheiden ist von der Filtrationsfähigkeit des ganzen Holzkörpers — kann innerhalb der äussersten Tracheïden ein grosser Ueberdruck und ein dadurch bedingter Hoftüpfelverschluss nicht zu Stande kommen. Man überzeugt sich leicht von dieser Thatsache, wenn man ein Stück Tannenholz, welches längere Zeit in Wasser gelegen hat, unter den Recipienten einer Luftpumpe bringt; beim Evacuiren gibt das Holz reichlich Wasser ab.

einer Quecksilberluftpumpe in Verbindung (Fig. 6). Bis auf den Grund des nach innen abwärts verlaufenden Bohrloches (Fig. 8, vgl. S. 44) führte ein Glasröhrchen, durch das die Evacuirung erfolgte, zugleich sollte es auch den Beginn des Wasseraustrittes aus dem Holze anzeigen. Die Pumpe wurde nun in Thätigkeit gesetzt, doch trat zu meiner grossen Verwunderung kein Tropfen Wasser aus dem Stamme in das Bohrloch, obwohl schliesslich in diesem die Spannung der Binnenluft einem Quecksilberdrucke von etwa 20 mm, bei einer Lufttemperatur von 13,5° C. und einem Barometerstande von 712 mm, entsprach.*) Trotzdem die Luftpumpe völlig dicht war und, wie es schien, auch ihre Befestigung am Stamme nichts zu wünschen übrig liess, so stieg die Spannung im Bohrloche doch ziemlich schnell: auf welchem Wege die Luft in dasselbe gelangte, vermag ich freilich nicht anzugeben, weil das in radialer Richtung durch die Markstrahlintercellularen ermöglichte Eindringen der Luft infolge einer Einfettung des entrindeten Stammtheiles verhindert war. Da jedoch durch wiederholtes Auspumpen 2 Stunden hindurch dafür Sorge getragen wurde, dass bei einem Barometerstande von 71 cm das Quecksilber im Manometer nicht unter 60 cm fiel, so herrschte die ganze Zeit des Versuches hindurch innerhalb des Bohrloches eine um mehrere Centimeter Quecksilber geringere Spannung als in dem benachbarten Splintholze.**) Ich wiederholte den Versuch an einer andern Tanne von etwa 15 m Höhe, 1,5 m über dem Erdboden und erhielt bei $^1/_2$ stündiger Saugung dasselbe negative Resultat.***)

*) Dem Wetterberichte dieses und der vorhergehenden Tage entnehme ich folgende Angaben (cfr. p. 15 Anm.):

1890	Barometer auf 0 red.			Temp Cels.			Feuchtigkeit.	
	7a	2p	9p	7a	2p	9p		
Septbr. 14.	711.1	711.4	711.4	6.9	11.2	9 0	81.3	Stark bewölkt.
„ 15.	710.9	711.3	711 3	9.2	10.0	9.4	96.0	Bedeckt.
„ 16.	711.2	710 2	711.5	9.4	11.2	7.3	86.0	Mässig bewegt.
„ 17.	711.8	712.0	712.6	3 8	15.1	3.4	80.0	Unbewölkt.

**) Nach den im II. Capitel mitgetheilten Spannungsbestimmungen der Binnenluft darf angenommen werden, dass auch in diesem Falle die Spannung circa 55 cm betrug.

***) Anm. Um mich zu vergewissern, dass innerhalb des Bohrloches wirklich während des Versuches eine geringere Spannung geherrscht habe als im umliegenden Holze, fällte ich diesen Stamm und stellte einige Spannungsbestimmungen an, von denen die beiden letzteren sich auf Holzpartien beziehen, welche in gleicher Höhe mit dem Bohrloche, doch um 135° davon entfernt lagen. Nur zum Vergleiche untersuchte ich noch ein 10 m höher gelegenes Stück.

cfr. p. 13 B. H. E. D. F. G. K. I.

Höhe in m.	Absolutes Gewicht	Volumen	Sättigungszunahme	corrigirte Ausflussmenge	Tracheidenluft vol.	Tension der Tracheïdenluft	In 100 Raumtheilen: Holz	Wasser	Luft
11,2	25,705	25,60	0,765	1,120	1,680	48,098	26,5	64,0	9,55
1,5	29,300	28,70	0,680	1,315	1,972	52,052	30,3	60,5	9,24
1.5	21,330	20,50	0,430	0,895	1,342	53,014	33,9	57,5	8,64

Durch den Ausfall dieses Experimentes ist also bewiesen, dass die vielbesprochene Beweglichkeit des liquiden Wassers im lebenden Stamme sich auch dann nicht constatiren lässt, wenn der möglicher Weise störende Einfluss der Hoftüpfel ausgeschaltet wird. Zugleich tritt an uns die weitere Aufgabe heran, im Innern des Holzkörpers die Widerstände für eine ausgiebige Bewegung des Wassers aufzusuchen.

Aus den Untersuchungen Jamin's ist bekannt, welchen Widerstand für die Wasserbewegung eine Luftblase ausübt, die sich in einer mit Wasser gefüllten Capillarröhre befindet und das zur Bildung zweier getrennter Menisken erforderliche Volumen besitzt. Es gelang nun Schwendener, den Nachweis für die Existenz der auf solche Weise in Gefässen der verschiedensten Bäume entstehenden „Jamin'schen Ketten" zu führen und durch Messung ihrer Dimensionen die Grösse des Widerstandes annähernd zu bestimmen, welcher durch eine derartige Anordnung der Luft für das Wasser hervorgerufen wird. Bei den Nadelbäumen finden sich dieselben Ketten innerhalb der einzelnen Tracheïden; es mussten daher bei der Aufstellung obigen Zellschemas die Eigenschaften der Jamin'schen Kette berücksichtigt werden.

Doch glaube ich (p. 8, Fig. 3) gezeigt zu haben, dass trotzdem das Binnenwasser in continuierlichen, den Baum in seiner ganzen Länge durchziehenden Fäden angeordnet sein kann.

Die Unhaltbarkeit der Annahme, dass die im Baume enthaltenen Wassertheilchen continuirliche Ketten bilden, erhellt jedoch genügend aus der Erwägung, dass in solchem Falle bei höheren Bäumen auf der Wurzel ein Druck von mehreren Atmosphären lasten müsste. Da ein solcher Druck, der sich experimentell sehr leicht würde nachweisen lassen, nicht vorhanden ist, darf obiges Schema infolge der darin zum Ausdruck gekommenen Continuität des Wassers keinesfalls auf den ganzen Stamm angewandt werden. Trotzdem lässt sich die Frage rechtfertigen, ob eine derartige dem Schema entsprechende Anordnung des Wassers nicht streckenweise im Holze vorkommen dürfte.

In den Ergebnissen einer Reihe von Manometerversuchen sah Schwendener*) nicht allein eine neue Bestätigung für die Ansicht der Discontinuität des Binnenwassers, sondern er wagte auch eine weitere Folgerung zu ziehen: durch das Vorhandensein von Luftunterbrechungen im Wassernetze könne es vorkommen, dass ganze Theile desselben nach allen Seiten durch Luft isolirt, gleichsam von einer Luftmauer gegen Eindringen des Wassers geschützt werden. Würde an irgend einer Stelle durch Druck (oder durch Wasserzufuhr) die Verbindung mit der Nachbarschaft wieder hergestellt werden, so würde dort, zumal bei einer im Innern herrschenden schwachen Luftverdünnung, ein langsamer Ausgleich erfolgen. Während also J. Vesque annahm, jede Luftblase befinde sich frei schwebend in einem continuierlichen, den

*) Schwendener, Saftsteigen, p. 580.

ganzen Baum durchziehenden Wasserstrome*), stellen bei Schwendener die Theile des Wassernetzes einzelne Gebiete dar, welche durch ein aus Luftmauern bestehendes Maschenwerk von einander geschieden sind, eine Vorstellung, welche erst noch des Beweises bedarf.

Die Möglichkeit, auf experimentellem Wege die Schwendener'sche Vorstellung zu prüfen, lässt sich aus seiner Bemerkung entnehmen, dass der Eintritt des Durchbruches einer derartigen Luftmauer, falls zugleich eine verschiedene Gasspannung in den beiden benachbarten Wassergebieten herrscht, einen Spannungsausgleich zur Folge haben müsse. Wenn es nun gelänge, in ein einzelnes Wassergebiet (welchem durch seine Binnenluft und durch sein Angrenzen an die aus verdünnter Luft bestehende Luftmauer eine gewisse Saugkraft innewohnt) ein mit Wasser gefülltes, nach aussen offenes Rohr zu befestigen, so würde, gemäss des im I. Kapitel mitgetheilten Satzes 7, die Atmosphäre mit stetig abnehmender Geschwindigkeit Wasser in den Holzkörper pressen. Durch allmälige Verringerung des Luftvolumens und dementsprechende Vergrösserung des Wasservolumens würde nun plötzlich eine Verbindung mit der Nachbarschaft hergestellt werden; dieser Moment würde aber durch augenblickliches Wachsen der Saugungsintensität zu erkennen sein.

Als Beweismaterial für das thatsächliche Vorkommen plötzlicher Aenderungen in der Saugungsintensität liesse sich fast jede der Beobachtungen früherer Experimentatoren verwenden, welche unter Zutritt der Atmosphäre von Bohrlöchern bekannte Wassermengen aufsaugen liessen und die dazu erforderlichen Zeiten feststellten. So beobachtete z. B. R. Hartig, welcher die Saugungsintensität des frischen im Vergleiche mit dem vor längerer Zeit gefällten Fichtenholze ermitteln wollte, dass dieselbe erheblichen Schwankungen unterworfen sei. Es saugte z. B. die eine der Fichten

während der ersten	$2^3/_4$	Min.	pro	Min.	0,37 ccm.
In den weiteren	$7^1/_4$	"	"	"	0,41 "
" " "	8	"	"	"	0,375 "
" " "	$12^1/_2$	"	"	"	0,52 "
" " "	$37^1/^2$	"	"	"	0,49 "
" " "	951	"	"	"	0,16 "

Es liegt in der Natur der Sache, dass diese Untersuchungen in Folge der anderen Fragestellung, welche zu ihnen führte, für vorliegende Frage nicht recht verwerthbar sind. Während es bei R. Hartig auf die Gesammtmenge des gesaugten Wassers ankam, erfordert die Untersuchung der Schwankungen in der Saugungsintensität möglichst zahlreiche, in geringen Zwischenräumen gewonnene Resultate. Anfangs versuchte ich die von mir in grösserer Zahl mit Hilfe der oben beschriebenen Glocken angestellten Experimente zu verwenden, bei denen die Saugung ganzer Stammtheile beobachtet wurde, doch selbst die dort erhaltenen Zahlenreihen erwiesen sich für unseren Zweck als unbrauchbar.

*) cfr. Schwendener, l. c. p. 591.

Je grösser nämlich die saugende Fläche ist, desto mehr ist dem eindringenden Wasser Gelegenheit geboten, mit den einzelnen Wassergebieten in Verbindung zu treten. Auf den Gesammtverlauf der Saugung kann aber eine grössere Zahl von sich neu bildenden Wasserverbindungen und der dadurch verursachten Intensitätssteigerungen nur summarisch wirken und wird das dem einzelnen Vorgange Charakteristische nur verdunkeln. Die Saugfläche muss also möglichst verkleinert werden, ohne jedoch die Genauigkeit der Messung des aufgesaugten Wassers erheblich herabzudrücken. Ausserdem möchte es sich zweckmässig erweisen, zum Versuche ein möglichst grosses Stammstück zu verwenden, dessen Binnenluft eine möglichst geringe Spannung besitzt. Auf Grund dieser Erwägungen wurde der Versuch in folgender Weise abgeändert:

In ein Stammstück von 50 cm. Länge aus der Krone einer Tanne wurde in horizontaler Lage eine Dolchmanometerspitze eingefügt, in welcher ein englumiges Glasrohr befestigt war. Unterhalb desselben war in seiner ganzen Länge auf einer festen Unterlage ein Papierstreifen angebracht. An Stelle des bisher verwandten Sekundenzeigers der Taschenuhr wurde ein hörbares Pendel benutzt und nach je 30 sec. das während dieser Zeit aufgenommene Wasservolumen durch einen Nadelstich auf dem darunter befindlichen Papiere notirt. Trotz des auch diesmal infolge der Saugflächenverkleinerung erheblichen Beobachtungsfehlers von $\pm$ 2,5 treten die Schwankungen deutlich hervor.

Nach je 30 sec. wurden aufgenommen:

100, 90, 90, 95, 100, 80, 85, 85, **145**, 35, **90**, 90, 90, 55, **120**, 80, **100**, 75, **95**, 80, 80, 85, 95, 85, 85, 90, 70, 80, Wasser, gemessen in Zehntel Millimetern des Beobachtungsrohres.

Die auf solche Weise beobachteten Differenzen bedürfen indessen noch einer Correctur; von den Zahlen nämlich, aus denen die Differenzen gebildet werden, ist möglicherweise die erste um 2,5 zu gross und die zweite um 2,5 zu klein beobachtet worden, sodass also z. B. bei der dritten und vierten Ablesung (90 und 95) vielleicht gleiche Saugungsintensität vorlag und nur durch mangelnde Schärfe der Beobachtung ungleiche Werthe notirt wurden. Alle Differenzen mithin, die nur 5 betragen, sind gar nicht zu gebrauchen. Ausserdem lassen sich für unsere Betrachtungen nur solche Differenzen verwenden, welche eine plötzliche Steigerung der Saugungsintensität anzeigen. Die aus obiger Zahlenreihe in Betracht kommenden Werthe sind durch stärkeren Druck hervorgehoben worden und liefern folgende Differenzen:

60; 55; 50; 65; 20; 20.

Nachdem auch von diesen der mögliche Fehler von 5 abgezogen ist:

55; 50; 45; 60; 15; 15.

Diesen Werthen entsprechen die Wassermengen:

45,5; 41,3; 37,2; 49,6; 12,4; 12,4 cbmm.

Die oben mitgetheilten Spannungsbestimmungen hatten derartige Resultate gegeben, dass wir als mittlere Binnenluftspannung etwa 55 cm Qd. annehmen dürfen. Es müsste also berechnet werden, wie gross ein Luftraum (x) mit der eben angegebenen Spannung gewesen sein musste, um z. B. durch eine Wassermenge von 45,5 cbmm. auf Atmosphärenspannung (= 700 mm Qd.) comprimirt zu werden. Nach Boyle-Mariotte ist

$$x : x - 45{,}5 = 700 : 550;\ \text{mithin}\ x = 212{,}3\ \text{cbmm.}$$

Nach den R. Hartig'schen Tabellen („Nadelwaldbäume" S. 137 — 147) enthält das Splintholz der Weisstanne etwa 10 % Luftraum; daraus berechnet sich das Volumen des von einer Luftmauer abgeschlossenen Wasserrevieres (Luft + Wasser + Holzsubstanz) auf 10 . 212,3 cbmm = 2,12 cbcm. Es ergeben sich darnach aus obigen Saugungsdifferenzen Saugreviere von der Grösse:

2,12; 1,74; 1,55; 2,31; 0,58; 0,58 ccm.

Betreffs der Anordnung der Tracheïdenelemente zu einer derartigen Gruppe, deren Grössenbestimmung sich die soeben ausgeführte Berechnung zur Aufgabe machte, lässt sich nur das eine mit ziemlicher Gewissheit sagen, dass nämlich die Luftblasen jeder Gruppe an einen continuirlichen Wasserfaden angrenzten, welcher plötzlich mit einer von der Saugungsfläche ausgehenden Wasserstrasse in Communication gerieth. Ob jener continuirliche Faden geradlinig in der Richtung der Fasern verlief, ob er sich baumförmig verzweigte, oder ob er als ein engmaschiges netzförmiges Gebilde zu denken ist, das lässt sich zur Zeit nicht entscheiden.

Ich habe hinsichtlich dieser Frage mehrfach makroskopisch wie mikroskopisch die Form der Grenzen des Ausbreitungsbezirkes von Farbstofflösungen untersucht, welche in das Holz gepresst wurden. Gabelung des Farbstoffstromes ist oft zu beobachten; und an Radialschnitten, welche an solchen mit Farbstofflösungen behandelten Hölzern angefertigt werden, zeigen sich öfters mehrere Centimeter lange, im Frühlingsholz gelegene Stellen, welche vom Strome völlig umgangen worden sind. Offenbar zwangen hier Luftmauern diesen zur Gabelung, doch gelang den dadurch entstandenen Armen später die Wiedervereinigung.

Denkt man sich nun im Splintholze eines ganzen Stammes das Wasser durch Luft in einzelne Gebiete zerlegt, zwischen denen jede Communication fehlt, dann ist leicht verständlich, wie schon durch einen verhältnissmässig geringen Luftgehalt des Holzes eine ausgiebige Wasserbewegung unmöglich gemacht ist. Schwendener hat diese Erwägung bereits durch eine schematische Darstellung („Saftsteigen" p. 582) anschaulich zu machen versucht, indem er zeigte, dass bei einem Luftgehalt von 34,7 % durch zweckmässige Vertheilung die Entstehung längerer continuirlicher Fäden sehr wohl vermieden werden kann. Im Splinte der Edeltanne, an welchem meine Beobachtungen angestellt wurden, dürfte der Luftgehalt höchstens 10 % betragen; ich werde im Folgenden eine Reihe von Versuchen mittheilen, aus denen hervorgeht, wie selbst

diese geringe Luftmenge die Bewegung des Binnenwassers beeinflusst.

Der Th. Hartig'sche Tropfenversuch, dessen Gelingen in jedem Falle von der Existenz continuirlicher, das ganze Versuchsholz durchziehender Fäden abhängig ist, lässt sich im Sommer an längeren Stücken aus frischem Stammholze von *Abies*, *Pinus*, *Picea*, *Quercus*, *Betula* und *Alnus* nicht ausführen (Schwendener, „Saftsteigen" p. 581), wenn nicht vorher der Wassergehalt künstlich vermehrt worden ist. Wie schwer eine solche Wasserzufuhr zu erzielen ist, zeigte sich schon bei obigen Sättigungsversuchen, noch auffälliger ist das Ergebniss des folgenden Experimentes. Im August 1889 beschäftigte ich mich mit der Messung des statischen Filtrationswiderstandes (Janse l. c. p. 36) von frischem Tannenholze. Es wurde ein Stammtheil von 1 m Länge und 6 cm mittl. Durchmesser in horizontaler Lage befestigt, nachdem über seine beiden Schnittflächen mit einem Gemisch von Wachs und Terpentin Glastrichter gekittet waren. Es wurde nun die untere Schnittfläche mit Wasser bedeckt und auf dieses der Druck einer einen Meter hohen Wassersäule ausgeübt. Trotz $1^1/_2$stündiger Wirkung blieb die obere Schnittfläche trocken. Die gleiche Beobachtung macht man an Stammstücken von etwa 10 m Länge, in welche fabrikmässig mit Hilfe eines 11 m hohen Flüssigkeitsdruckes zur Conservirung des Holzes Kupfervitriollösung gepresst wird; es beginnt hier an dem oberen Stammende oft erst nach mehreren Tagen der Saftaustritt. Nur bei jungen Stämmen von circa 6 m Länge ist er oft schon nach einigen Minuten bemerkbar.*)

Nur in gewisser Hinsicht ist an dieser Stelle ein Versuch Schwendeners (l. c. pag. 578, 580.) anzuführen, welcher sich zur Aufgabe machte, die Einwirkung einer unter gewissem Drucke in den Splint erfolgenden Wasserinjection auf benachbarte Manometerspitzen zu untersuchen. Der Versuch führte zu einem negativen Resultat.

Am 1. September 1890 wiederholte ich Schwendeners Experiment in etwas veränderter Form. In eine etwa 20 m hohe Tanne bohrte ich 70 cm über dem Erdboden mit dem Centrumbohrer ein etwa 4 cm tiefes Loch und 65 cm darüber ein ebensolches. Das untere wurde mit einem kleinen Trichter (Fig. 7), das obere mit einem abgeschliffenen Standgefäss (Fig. 8, vgl. p. 44) verschlossen, in dem noch ein Thermometer angebracht war, da ich mit dem Versuche eine Temperaturbestimmnug des Baumsaftes zu verbinden gedachte. Ich hoffte nämlich durch Anwendung von starkem Quecksilberdrucke dennoch im Libriform eine Wasserbewegung zu erzielen und durch die Injection einer anderen Flüssigkeit das in den Tracheïden enthaltene Wasser nach dem oberen Bohrloche treiben zu können. Als Injectionsflüssigkeit wählte ich zuerst Eisenchloridlösung, welche ich mit einem Ueber-

*) Diese Beobachtung verdanke ich Herrn Förster Wild, Inhaber einer Imprägnirungsanstalt auf dem Adlisberg bei Zürich.

drucke von 2 Atm. 3 Stunden hindurch in das untere Bohrloch presste.*)

Zu Beginn des Versuches liess ich nicht sogleich den vollen, mir zur Verfügung stehenden Druck wirken, denn unbedingt würden durch einen einseitigen plötzlich wirkenden Ueberdruck von solcher Stärke auf die Membranen der Hoftüpfel letztere geschlossen worden sein, und dadurch wäre der ganze Versuch werthlos geworden. Nachdem das Bohrloch mit Eisenlösung gefüllt war, übte ich anfangs mit Hilfe einer etwa 5 cm hohen Quecksilbersäule auf die Bohrlochwandung einen Zug aus, welcher durch allmähliches Heben des Quecksilberbehälters in Druck übergeführt wurde: der volle Ueberdruck von 2 Atm. wirkte erst nach 5 Minuten.

Da 3 Stunden hindurch das obere Bohrloch völlig trocken blieb und auch zwischen beiden Bohrlöchern eingesetzte Manometer nur Saugung anzeigten, so unterbrach ich den Versuch. Die Eisenchloridlösung hatte sich durch die Einwirkung des schon durch andere Metalle verunreinigten Quecksilbers dermassen getrübt, dass ich das Ausbleiben des erwarteten Resultates auf eine Verstopfung der angeschnittenen Tracheïden des unteren Bohrloches zurückführen zu dürfen glaubte. Da bei dem hohen Drucke zwischen Trichter und Bohrloch beständig Injectionsflüssigkeit austrat und am Stamme herabfloss, liess sich nicht erkennen, ob überhaupt Eisenlösung in den Splint gelangt sei.

Es wurde deshalb der Baum gefällt und der in Frage kommende Stammtheil mit der Kreissäge in Scheiben zerschnitten, wobei sich zeigte, dass durch das untere Bohrloch 28 Jahresringe geöffnet worden waren. Da die untere Hälfte der Lochwandung eingefettet worden war, so war der grösste Theil der Flüssigkeit nach oben gepresst worden. Die Bahnen des Farbstoffes befanden sich im 1., 5., 6., 7., 9., 10. und 19. bis 28. Jahresringe. Eine analoge Beobachtung der Bevorzugung gewisser Zonen des älteren Splintholzes habe ich an anderer Stelle („Verschlussfähigkeit" p. 15. Anm.) mitgetheilt. In horizontaler Richtung war der Farbstoff vom Bohrloche aus nur gegen 2 cm. in verticaler Richtung im 8., 11. bis 18. Jahresringe noch bedeutend weniger eingedrungen. Während in dem jüngsten Holze das Eisen 45 cm hoch über dem unteren Bohrloche nachweissbar war, zog sich in den übrigen Jahresringen ein sich bald bedeutend verschmälernder, doch sich mehrfach gabelnder Strom nach oben, dessen letzte Ausläufer die Höhe von 70 cm erreichten. Sämmtliche Strömungsbahnen verliefen nicht genau senkrecht, sondern sie hatten eine Rechtsdrehung erfahren, welche in der Höhe von 45 cm etwa 27° betrug. Da ich diese Torsion bei der Anlage des oberen Bohrloches nicht be-

*) Zur Hervorbringung des Druckes diente das in Fig. 6 d dargestellte, mit Quecksilber gefüllte Glasrohrsystem, das ich schon in dem cit. Berichte der deutschen Bot. Gesellschaft genau beschrieben habe. Ebendaselbst (Fig. 3) findet sich auch eine detaillirte Abbildung des aus Stahl und Glas construirten Apparates, welcher auch bei dem Versuche verwandt war und zur Aufnahme der Eisenlösung diente.

rücksichtigt hatte, wiederholte ich den Versuch mit einigen Abänderungen.

Die Bohrlöcher wurden in der Entfernung von 10 cm angebracht und diesmal Eisenvitriollösung injicirt. Zuerst wirkte eine Stunde hindurch ein Quecksilberdruck von 1,5 Atm., darauf während 3 Stunden eine 2 m hohe Wassersäule und schliesslich noch eine halbe Stunde der anfängliche Quecksilberdruck. Ein Ueberfiltriren in das obere Bohrloch fand auch dieses Mal nicht statt, obgleich, wie die darauf folgende Section ergab, der aufsteigende Strom das Bohrloch gestreift hatte. Auf seinem weiteren Verlaufe zeigte er auch in diesem Falle eine geringe Rechtsdrehung und Gabelung. Der nach innen gerichtete Arm des letzteren erreichte im 25. bis 30. Jahresringe die Höhe von 33 cm, während die Höhe des äusseren, im jüngsten Splinte verlaufenden leider nicht notirt wurde.

Bei diesen Versuchen macht sich die geringe Beweglichkeit des Binnenwassers dadurch geltend, dass trotz des grossen angewandten Ueberdruckes nur so geringe Mengen der Injectionsflüssigkeit in den Splint gelangen konnten. (Auch bei dem Schwendener'schen Versuche nahm eine Kiefer unter dem Drucke von 600 mm Quecksilber in einer Stunde nur 4 bis 6 cbcm Wasser auf.) Die Druckkräfte greifen hier in gleicher Weise an, wie wir uns die Wirkung des Wurzeldruckes vorzustellen haben; das Ergebniss vorliegender Versuche macht aber nicht den Eindruck, dass es möglich sei, durch eine am unteren Ende des Stammes befindliche Druckkraft den Saft innerhalb des Stammes auf weite Strecken hin zu verschieben.

Es stehen diese Resultate scheinbar im Widerspruche mit den Voraussetzungen der oben zur Anwendung gelangten Methode für die Spannungsbestimmung der Binnenluft. Während dort der Ueberdruck von 2 Atm. genügte, um in wenigen Minuten den Saft innerhalb eines etwa 30 ccm grossen Holzstückes zu verschieben (cfr. p. 41), soll innerhalb des Stammes der gleiche Ueberdruck nur so geringe Wirkungen hervorbringen. Es hat dies wohl darin seinen Grund, dass die kleinen Holzcylinder auf allen Seiten dem unter Druck einströmenden Wasser ausgesetzt waren, während bei den Injectionsversuchen nur auf eine kleine Bohrlochfläche Druck ausgeübt wird, der sich (gemäss des Zusatzes zum 1. hydromechanischen Satze) infolge der Reibungswiderstände mit zunehmender Entfernung vom Bohrloche aus sehr schnell verringert.

Ferner muss noch erklärt werden, aus welchem Grunde der Injectionsstrom die nahe gelegenen Bohrlöcher umging und statt dessen die scheinbar viel grössere Widerstände darbietenden Splintholzbahnen vorzog, wodurch natürlich die Erreichung der erhofften Resultate unmöglich gemacht wurde. Wir haben zu berücksichtigen, dass alle Tracheïden der Splintholzzone verdünnte Luft enthalten. Die injicirte Flüssigkeit wählt natürlich die Bahnen, auf denen sie den geringsten Widerstand zu überwinden hat. Da nun in den Bohrlöchern und Manometerspitzen der Druck der Atmo-

sphäre herrschte, wurden diese von der Eisenlösung sorgfältig vermieden und statt dessen die noch unverletzten, mit verdünnter Luft gefüllten Holzpartien vorgezogen.

Besonders bei diesen Injectionsversuchen drängt sich die Frage auf, weshalb die Eisenlösung nicht eine mehr horizontale Strömungsbahn eingeschlagen habe, da durch die tüpfelreichen Radialwände eine solche sehr wohl möglich wäre.

Elfving*) ist der Meinung, dass der Filtrationswiderstand, den er bei solchen Versuchen wirksam fand, allein durch die grössere Zahl der Zellwände gebildet werde, welche ein quertangential gerichteter Strom im Vergleich zu einem längsgerichteten zu passiren hat. Mir scheint es, als käme hier auch die Vertheilung der Luft im Holze in Frage.

Denkt man sich aus einem Jahresringe eine im Holzkörper tangential gelegene, quadratförmige Platte geschnitten, so wären in dieser zwei Hauptrichtungen der Filtration denkbar, die eine längs des Faserverlaufes und die andere rechtwinklig dazu. Je länger die Wassersäulchen der Jamin'schen Ketten sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie auf irgend einem Punkte ihres Verlaufes mit den Wassersäulchen in den benachbarten Tracheiden communiciren. Ist diese Wahrscheinlichkeit in einem Falle verwirklicht, communicirt also ein Wassersäulchen in seinem obersten Theile mit dem untersten Theile eines Wassersäulchen der Nachbarkette, so ist dadurch ein continuirlicher Wasserfaden entstanden, dessen Länge hinsichtlich der Längsfiltration 2 Wassersäulchenlängen, hinsichtlich der Querfiltration jedoch nur 2 Wassersäulchenbreiten beträgt. So existiren möglicherweise in unserer quadratischen Holzplatte in der Längsrichtung mehrere, von einander unabhängige continuirliche Wasserfäden von einer Kante zur andern, während die Querrichtung keinen einzigen aufzuweisen hat. (Vgl. Fig. 9.)

Handelt es sich nun darum, eine Querfiltration z. B. an einem wasserreichen, zwar mit nur spärlichen, doch unbehöften Poren versehenen Weiden-Holze einzuleiten,**) so ist dazu nur erforderlich, auf die eine Seite einen derartigen Ueberdruck wirken zu lassen, dass durch ihn die Jamin'schen Ketten solange verschoben werden, bis die Bildung zusammenhängender Wasserfäden erfolgt. Anders aber gestalten sich die Verhältnisse beim Nadelholze, dessen Hoftüpfel verschliessbar sind. Der Druck, welcher besonders bei den von Sachs***) und mir†) verwandten grösseren Holzcylindern zur Verschiebung der Jamin'schen Ketten erforderlich gewesen wäre, konnte gar keine Wirkung ausüben, da durch ihn die Hoftüpfel verschlossen worden waren. Denn die Durchlässigkeit der Poren ist die wichtigste Bedingung für eine ausgiebige Filtration durch den Holzkörper.

---

*) „Ueber die Wasserleitung im Holze." Bot. Ztg. 1882, 712

**) Schwendener (l. c. 581).

***) Arb. des Bot. Inst. zu Würzburg, II, p. 298.

†) l. c. p. 14.

Die erfolgreichen Versuche Strasburgers (l. c. 740), welche an dünnen, radial verlaufenden Tannenholzplatten angestellt wurden, lassen sich erst dann zur Entscheidung für die Ansicht Elfvings verwerthen, wenn die Abwesenheit aller Binnenluft in jenem Holze bewiesen wird.

Auch die Frage nach der Funktion der Hoftüpfel scheint mir durch die neueste Publication Strasburgers noch nicht erledigt zu sein. Betreffs dieser unter den höheren Pflanzen so weit verbreiteten Tüpfelform sind bisher nur wenige Thatsachen sicher gestellt, die sich zum Theil nur auf die Frühholztüpfel beziehen: das Geschlossensein der Hoftüpfel im Kernholze und im lufttrocknen Splintholze (Russow[1]), die geringe Permeabilität der feuchten Filtrirmembran für Luft (Russow[2]), Lietzmann[3]), die grosse Filtrationsfähigkeit des Margo für Wasser (Th. Hartig[4]), Godlewski[5]), Schwendener[6]), Janse[7]) und die Möglichkeit der Herbeiführung eines künstlichen Verschlusses durch Wasserdruck.

Bei der experimentellen Untersuchung der letzteren Frage kam es mir zunächst nur darauf an, gegenüber den Ansichten Godlewski's und Janse's die Verschlussfähigkeit der Hoftüpfel zu beweisen; über die Grösse der zum Verschlusse erforderlichen Kräfte liess sich nichts Bestimmtes ermitteln.

Betrachten wir zunächst die Hoftüpfelmembranen als straff gespannte Gebilde, deren Elasticitätsgrenze bei einem Verschlusse des Tüpfels nicht überschritten wird. Meine Versuche haben das Resultat ergeben, dass sich die Tüpfel bei einem einseitigen Ueberdrucke von etwa $^1/_{14}$ Atm.[8]) schliessen. Nehmen wir an, der Durchmesser der Schliessmembran betrage 0,0156 mm, also ihre Fläche 0,000191 qmm, so würde die Membran in dem zum Verschlusse erforderlichen Maasse gedehnt werden durch die Belastung von etwa 0,137 mgr.

Ob diese Arbeit durch die Bewegung einer Wassermenge oder durch den Druck eines Gases geleistet wird, ist für das Endresultat gleichgültig; in jedem Falle ist für das Auseinanderzerren der Micellen der Schliessmembran die gleiche Kraft erforderlich. Da jedoch diese Kraft nie plötzlich in voller Höhe angreift, sondern erst allmählich bis zum erforderlichen Maasse wächst, so macht sich hier noch die Permeabilität des Margo geltend, welche wegen ihrer für Wasser und Luft verschiedenen Grösse diese Vorgänge complicirt. Führen wir nämlich den Verschluss herbei, indem wir im einen Falle einen Strom Wasser, im anderen einen Strom Luft durch den Tüpfel treiben, dessen Geschwindigkeit wir bis zum

[1]) Bot. Centralbl. 1883, XIII. p. 36.
[2]) l. c. p. 105.
[3]) Flora. 1. Aug. 1887. Kap. 21—44.
[4]) Bot. Ztg. 1853.
[5]) Pringsheims Jahrb. XV. p. 589.
[6]) Sitzungsber. d. Akad. d. Wissensch. zu Berlin 1886. p. 579.
[7]) Pringsheims Jahrb. XVIII. p. 36.
[8]) l. c. 17.

gewünschten Ziele steigern, so erhalten wir das Resultat, dass bei der Anwendung von Luft der Tüpfelverschluss bei geringerer Strömungsgeschwindigkeit eintritt.

Letztere Erwägung veranlasste wohl Strasburger zu der Meinung, dass innerhalb des lebenden Baumes der Tüpfelverschluss stets nur durch Luft ausgeführt würde; „durch Wasserströme in der Pflanze kann ein Verschluss der Hoftüpfel nicht bewerkstelligt werden," da die zu diesem Zwecke erforderlichen Geschwindigkeiten nicht vorkommen dürften (l. c. 735). Zur Prüfung dieser Ansicht möge folgende Betrachtung dienen.

Man denke sich ein längeres Rohr, dessen eines Ende durch ein hoftüpfelartiges Ventil gebildet wird. Durch dieses Rohr bewege sich eine Wassermenge und zwar mit dem Maximum der Geschwindigkeit, welches nach den Eigenschaften des Abflussventils möglich ist. Es soll nun plötzlich von dieser in Bewegung befindlichen Wassersäule eine kleine Luftmenge mitgeführt werden, welche zunächst die Geschwindigkeit des Wassers in keiner Weise beeinflussen soll. In dem Momente, wo diese Luftmenge das Ventil berührt, tritt wegen der für Luft geringeren Permeabilität eine Veränderung ein; die Luft prallt auf das Ventil und wird durch den Stoss des nachfolgenden Wassers comprimirt. Es sind nun zwei Fälle denkbar: die Compression des Gases erreicht die zum Ventilverschlusse erforderliche Höhe, oder der Stoss vermag das Ventil nicht zu schliessen. Welcher von beiden Fällen eintreten wird, ist allein von der Bewegungsgrösse (dem Produkte aus der Masse in die Geschwindigkeit) des der Luftmenge folgenden Wassers abhängig.

Woher weiss aber Strasburger etwas von der Existenz solcher Bewegungsgrössen? Ueberdies ist auch nicht einzusehen, zu welchem Zwecke solche Hoftüpfelfunction, welche ein Analogon zur Funktion des Klappenventils beim Montgolfierschen hydraulischen Stosswidder*) darstellen würde, im lebenden Stamme dienen sollte.

Der Vorgang des Hoftüpfelverschlusses lässt sich auch in der Weise umkehren, dass durch Entfernung des auf der einen Seite der Schliessmembran lastenden Druckes die Einwirkung der Atmosphäre oder einer im Holze abgeschlossenen Luftmenge höhere Spannung ermöglicht und dadurch der Verschluss ausgeführt wird. Strasburger nimmt nun an, dass zeitweise irgendwo im Holzkörper eine rapide Wasserentziehung stattfindet (l. c. 736). Das die Tüpfel bespülende Wasser wird hindurchgezogen, bis Luft die Schliessmembranen berührt. Durch fortgesetzten Wasserverbrauch entsteht im Holze ein luftverdünnter Raum, infolge dessen die Luft der benachbarten Zellen die Hoftüpfel schliessen. Doch wo wirkt im unverletzten Strome eine solche Saugung, die eine Quecksilbersäule um 5 cm heben müsste? Böhm hat zwar auf experi-

*) Vgl Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik, 9. Aufl. I, p. 411; am ausführlichsten berichtet darüber Weisbach, Ingenieur- und Maschinenmechanik 1855 III, p. 963.

mentellem Wege gezeigt, dass bei lebhafter Transpiration eine Quecksilbersäule fast auf Barometerhöhe gehoben wird. Doch gelingt dies nur bei Zweigen; nehmen wir statt dessen etwa 20 m lange Bäume und ersetzen das Quecksilber durch Wasser, das in den natürlichen Bahnen gehoben werden soll, so lässt sich nicht beweisen, dass schon allein durch die Transpiration das Wasser (ohne Abzug der Reibungswiderstände) 10 m hoch steigt. Denn in den Bäumen befinden sich meistentheils keine continuirlichen Wasserfäden. Eine von den transpirirenden Flächen ausgehende Saugung würde dieselbe Wirkung haben wie die künstliche Evacuirung eines Bohrloches. Sicherlich grenzten auch bei meinem oben (Seite 24) mitgetheilten Versuche continuirliche Wasserfäden geringer Länge an das Bohrloch: doch bei der Entziehung einer geringen Wassermenge rissen die Fäden und konnten somit kein Wasser nach den mit verdünnterer Luft gefüllten Gebieten leiten. Aus diesem experimentellen Ergebnisse lässt sich folgern, dass die von den transpirirenden Flächen ausgehende Saugkraft ebenso wenig wie der Wurzeldruck im Stande ist, direkten Einfluss auf die Bewegung des Binnenwassers innerhalb des Stammes auszuüben oder womöglich die Hoftüpfel zu verschliessen.

Diese Betrachtungen ruhen zum grossen Theile auf der Vorstellung, dass die Schliessmembranen durch einen Tüpfelverschluss nicht überdehnt werden. Einige Ergebnisse von Filtrationsversuchen*) deuten aber darauf hin, dass bei längerer Inanspruchnahme der Filtrationsfähigkeit ein Tüpfelverschluss schon bei sehr geringem Drucke eintritt.

Strasburger**) ist freilich der Meinung, dass diese Erscheinung von einer durch den Inhalt der zerschnittenen Markstrahlen verursachten Verstopfung herrühren könnte. In der graphischen Darstellung, die ich von den Ergebnissen des Versuchs A auf der zu meiner oben erwähnten Arbeit gehörigen Tafel gegeben habe, ist angegeben, dass nach stattgehabtem Tüpfelverschlusse bei Anwendung schwächerer Druckkräfte die Filtrationsfähigkeit ihre frühere Höhe erreicht. Es liegt also kein Grund vor, Verstopfungen anzunehmen. Das Höhnel-Sachs'sche Verfahren, durch Abtragen einer zarten Lamelle die Filtrationsfähigkeit wieder zu erhöhen, habe ich öfters angewandt (l. c. 10), doch absichtlich auf die dabei erhaltenen Resultate kein Gewicht gelegt; sie sind zur Entscheidung der Frage, ob das Holz seine Filtrationsfähigkeit infolge von Verstopfung oder Verschluss resp. Ueberdehnung der Tüpfelmembranen verliere, nicht zu gebrauchen. Ich habe schon früher (l. c. 16) ausführlich dargelegt, dass bei Filtrationsversuchen, sobald der in den einzelnen Tracheïden bestehende Druck stationär geworden ist, alle vom Filtrationsstrom durchquerten Tüpfel demselben Ueberdruck ausgesetzt sind. Bei einer langsam und stetig vor sich gehenden Steigerung des Filtrationsdruckes und bei der Voraussetzung, dass alle Hoftüpfel die

*) „Verschlussfähigkeit", p. 11.
**) l. c. 744.

gleichen physikalischen Eigenschaften besitzen, würde ein Zeitpunkt kommen, in dem sich alle Tüpfel des ganzen Splintholzes schliessen. Thatsächlich wird dieser Zustand nie erreicht; abgesehen davon, dass die letztere Bedingung der physikalischen Gleichartigkeit nicht erfüllt zu sein scheint (l. c. p. 15, Cap. VI), steigerte ich die Druck ausübende Quecksilbersäule jedes Mal plötzlich um 10—30 cm Höhe. Dadurch sind aber, sobald der Druck die erforderliche Höhe erreicht hatte, ehe noch die Druckverhältnisse der Binnenluft stationär geworden sind, alle die Tüpfel geschlossen worden, welche der Filtrationsstrom zuerst passirte; dadurch wurde einem Verschluss sämmtlicher übrigen Tüpfel vorgebeugt. Durch Abtragen einer Lamelle werden nun die am meisten in Anspruch genommenen und überdehnten Tüpfel beseitigt;*) die zu beobachtende Filtrationszunahme ist also auch auf diese Weise sehr erklärlich.

Freilich lässt sich zur Zeit über die Art der physikalischen Veränderung, welche die Hoftüpfelschliesshaut beim Tüpfelverschluss erleidet, nichts angeben; sicherlich sind ihre physikalischen Eigenschaften weit complicirter, als man bisher angenommen hat. Spätere Untersuchungen werden vielleicht darüber Aufschluss geben, wie weit hier Ueberdehnungserscheinungen und elastische Nachwirkungen eine Rolle spielen.

IV. Resultat der Spannungsbestimmungen.

Nach den eingehenden Erörterungen über die merkwürdige Vertheilung der Luft und des Wassers im Splintholze und über die dadurch bedingte relative Unbeweglichkeit des Wassers wird es nun nicht mehr unmöglich erscheinen, dass bei meinen obigen Bestimmungen über die Spannung der Binnenluft an verhältnissmässig nahe bei einander gelegenen Orten so erhebliche Spannungsverschiedenheiten thatsächlich vorhanden waren.

Die in der Tabelle auf Seite 15 zusammengestellten Resultate gestatten wohl die Annahme, dass die Binnenluft in allen Regionen der jüngeren Jahresringe des Stammes eine negative und wenn auch etwas verschiedene, so doch von der Stammhöhe unabhängige Spannung besessen hat.

So lange man glaubte, dass die Transpirationssaugung im Stande wäre, ein bis in die Wurzeln continuirlich verlaufenden Wassernetz zu heben, scheint eine Erklärung der Entstehung luftverdünnter Räume in der Pflanze keine Schwierigkeiten geboten zu haben; wenn eben die durch die Wurzel erfolgende Wasserzufuhr für die Transpiration nicht ausreichte, so wurde Wasser aus dem Stamme verbraucht, und in Folge dessen

*) Ich möchte an dieser Stelle noch besonders hervorheben, dass ich bei dem Satze, „entweder werden alle Tüpfel etwas, oder nur einige verhältnissmässig mehr geschlossen“ (l. c. 11), nur an die Tüpfel des Holzcylinders gedacht hatte, welche an der einen Schnittfläche desselben liegen, mithin also zuerst vom Filtrationsstrom getroffen werden.

die Binnenluft ausgedehnt. Nachdem es nun aber geboten erscheint, von der Einwirkung der Transpirationssaugung auf die Wasserbewegung im Stamme gänzlich abzusehen, so erwacht mit der Schwierigkeit der Erklärung des Saftsteigens zugleich die Frage nach der Entstehung der Binnenluftverdünnung.

Zu der Ansicht von Nägeli und Schwendener*), dass im Stamme noch andere, auf zahlreiche, naheliegende Punkte vertheilte Kräfte, vermuthlich innerhalb der Markstrahlen, wirksam sind, lieferte Russow**) durch seine Untersuchungen über die einfach und doppelt behöften Poren eine wichtige Stütze. Ueber die Art und Weise jedoch, wie die Funktion zu denken sei, lässt sich freilich zur Zeit wenig sagen; wir müssen uns zunächst mit der Vorstellung begnügen, dass jede Markstrahlzelle in Folge eines von den transpirirenden Flächen ausgehenden Reizes das Wasser von tiefer gelegenen Stellen nach höher gelegenen zu heben vermag.

Es liegt am nächsten, sich die Thätigkeit dieser Zellen als eine constante vorzustellen. Betrachten wir eine kleinere Gruppe von Markstrahlen bezüglich des Effektes ihrer Thätigkeit, so wird durch sie ceteris paribus eine Hebung des Wassers erfolgen, ohne dass die Binnenluft ihrer Menge und Spannung nach irgendwelche Veränderungen erleidet, wobei natürlich eine Beziehung der Binnenluft zu den lebenden Zellen von vorne herein ausgeschlossen ist. Nun besitzen aber feuchte Zellmembranen eine geringe Permeabilität für Luft; für die Dauer wäre also die Existenz eines im Holze befindlichen Luftvolumens negativer Spannung nicht möglich, wenn nicht durch eine Einrichtung eines fortwährenden Luftverbrauches für das Fortbestehen der Luftverdünnung Sorge getragen wäre. Dabei ist die Luftzufuhr keine unerhebliche: abgesehen von den Luftmengen, welche mit dem Bodenwasser aufgenommen und unter der geringeren Spannung in der Pflanze zum grossen Theile abgegeben werden, durchzieht das Holz ein Durchlüftungssystem, welches durch die Lenticellen in offener Communication mit der Atmosphäre steht, sodass selbst die Tracheïden des älteren Splintholzes nur durch eine einzige Zellwand von der Luft der Intercellularräume geschieden sind.

Dieser Luftzufuhr steht ein Luftverbrauch gegenüber, welcher durch die Athmung der lebenden Zellen und durch die Absorption der dadurch erzeugten Kohlensäure bedingt ist. Sollte es einmal gelingen, den Nachweis zu führen, dass die Höhe der negativen Spannung zu gewissen Zeiten constant ist, so wäre damit das Vorhandensein eines Gleichgewichtes zwischen Luftzufuhr und Luftverbrauch bewiesen.

Gegenüber der Annahme einer gleichsinnigen und in gleicher Intensität wirkenden Verrichtung ist die Möglichkeit einer periodisch wirkenden geltend gemacht worden, doch lässt sich zur

*) „Das Mikroskop." 1. Aufl. S. 382 ff. 2. Aufl. S. 378 ff.

**) Sitzungsber. der Dorpater Naturforscherges. 1877. IV. 3. 601. 602 und Bot. Centralblatt 1883. S. 36.

Zeit nicht viel zu Gunsten dieser Ansicht anführen. Dass ganze Gruppen benachbarter Markstrahlzellen zu gleicher Zeit im gleichen Sinne thätig sind, also etwa in akropetaler Folge Wasser in die Tracheïden pressen, wodurch unter anderem das Auftreten der oft erheblichen Unterschiede in der Gasspannung erklärt werden könnte, ist nicht anzunehmen. Ich habe zu diesem Zweck die Saugungsintensität eines Bohrloches während 9 Stunden untersucht; die 250 mir vorliegenden Messungen lassen nichts von derartigen Druckschwankungen erkennen (Fig. 10). Auch die viertägige Beobachtung mit Hilfe eines Apparates, der vorübergehend aufgetretene Druckwirkungen angezeigt hätte, führte zu keinem Resultate (Fig. 11). Wieler*) beobachtete bei Turgoranalysen, die er mit Hilfe der de Vries'schen plasmolytischen Methode an Parenchymzellen von Coniferen ausführte, verschiedene Turgorspannungen in verschiedenen Theilen des Stammes. Es wäre möglich, dass diese Mittheilung zum Ausgangspunkte einer erfolgreichen Untersuchung zu verwerthen wäre, welche auch einigen Aufschluss über die Constanz oder Periodicität der Markstrahlfunktion geben könnte. Eine Anregung zur Annahme einer periodischen Funktion scheint von der Russow'schen Untersuchung ausgegangen zu sein, auf Grund derer jener Forscher die Markstrahlen als Saugpumpen und die Hoftüpfel als damit in Beziehung stehende Ventile auffasste. Wenn nun auch alle Versuche, welche zur Fortführung dieser Ideen unternommen sind, noch zu keinem sicheren Resultate geführt haben, so erscheint mir doch allein schon in der Construction der Hoftüpfel ein Hinweis auf periodische Vorgänge zu liegen. Jedenfalls bringt ein Maschinenbauer nur dort verschlussfähige Klappenventile an, wo er es mit Kraftquellen von schwankender Intensität zu thun hat.

Zusammenstellung der Resultate.

1) Die Binnenluft in den Splintholztheilen, welche nicht unter dem unmittelbaren Einflusse der Transpiration der Blätter stehen, besass bei der von mir untersuchten Tanne in allen Baumhöhen einen annähernd gleichen Grad negativer Spannung, welche etwa $^3/_4$ bis $^4/_5$ Atmosphären beträgt. Eine mit der Höhe zunehmende Verdünnung war nicht vorhanden.

2) Das liquide, im Innern der Tracheïden befindliche Wasser bildet keine, den ganzen Stamm von der Krone bis zur Wurzel durchziehende Fäden. Die Wassermassen sind durch Luft von einander getrennt. Die Möglichkeit einer Wasserbewegung zwischen Luftblase und Holzwandung konnte experimentell nicht nachgewiesen werden.

3) Durch die Communication von Wassersäulchen, die benachbarten Jamin'schen Ketten angehören, kommen continuirliche, nur von den sehr permeabeln Hoftüpfelmembranen durchsetzte

*) Pringsheim's Jahrb. XVIII, p. 81.

Wasserfäden in begrenzter Zahl und Länge zu Stande. Die Grösse der dadurch bestimmten Wassergebiete kann experimentell festgestellt werden.

4) Unsere Kenntniss von den physikalischen Eigenschaften der Schliessmembranen in den behöften Tüpfeln ist noch so mangelhaft, dass zur Zeit die Aufstellung einer Theorie über die Funktion der Hoftüpfel unmöglich ist.

Zusätze.

Ueber die Beschaffenheit der Schnittflächen des Holzes.

ad. A. Bei der Zubereitung des Holzcylinders ist es natürlich unmöglich, dass seine obere und untere Endfläche durch die Enden unverletzter Tracheïden gebildet werden, wie dies eigentlich die Theorie der Methode erforderte. Ueberall sind Tracheïden angeschnitten worden und diese haben sich sofort (cfr. Satz 3) mit Luft gefüllt. Es ist nun dieser Umstand in zweifacher Hinsicht eine Fehlerquelle: das zuvor in den Zellen enthaltene Wasser hat bei seinem Uebertritte in benachbarte, unverletzte Zellen die dort befindliche Luft etwas comprimirt; ferner ist durch das Eindringen der Luft in die angeschnittenen Tracheïden der Luftgehalt des ganzen Holzes fälschlich vermehrt. Aus beiden Gründen wird schliesslich ein geringerer Grad von Luftverdünnung berechnet, als thatsächlich im lebenden Baume vorhanden war. Es schien mir erwünscht, bei einem Holzcylinder das Volumen des in den angeschnittenen Tracheïden befindlichen Luftraumes zu ermitteln, um die Tragweite der angedeuteten Fehlerquelle überschen zu können.

Zu diesem Zwecke wurde ein Holzcylinder, dessen Höhe 6 cm, dessen Volumen 23,60 ccm betrug, in den Recipienten der Quecksilberluftpumpe gebracht, vermittelst negativen Druckes Wasser aus ihm gesaugt (cfr. Satz 4). Durch Eintauchen in Quecksilber füllten sich nun die angeschnittenen Tracheïden mit Metall und in Folge dessen erschienen auf den Querflächen die weitlumigen Frühholzpartieen grau gefärbt. Nun wurde das Holz durch Einwirkung von kochender rauchender Salpetersäure zerstört und das durch Behandlung mit Salzsäure schliesslich in Lösung übergeführte Quecksilbersalz von den organischen Rückständen getrennt.

Durch Fällung mit Schwefelwasserstoff wurde bestimmt, dass 0,7066 gr Quecksilber in das Holz eingedrungen waren. Der Metallmenge entspricht ein Volumen von 0,052 ccm, also 0,22% des ganzen Holzvolumens.

Dazu kommt noch Folgendes: Beim Eintauchen eines beliebigen Holzstückes in Wasser sieht man aus den Zelllumina kleine Luftblasen treten, welche zunächst aussen am Holze hängen bleiben. Der oben berechnete Fehler von 0,22% verringert sich dadurch noch etwas und ist deshalb jedenfalls zu vernachlässigen.

ad C. und D.

1. Ueber die Einrichtung des Apparates.

Zu den Versuchen diente der von mir in den Berichten der Deutschen Bot. Gesellschaft, Band VII, Seite 6 genau beschriebene und dort auch abgebildete Apparat. Die geringen Abänderungen ergeben sich aus der zu der vorliegenden Arbeit gehörigen Figur 4.

Der Druck wurde durch eine Quecksilbersäule erzeugt, deren Höhe nach dem jeweiligen Barometerstande und den sonstigen Nebenumständen (z. B. Steigen des Quecksilberniveaus innerhalb des Apparates) durch Heben und Senken des Quecksilberreservoirs regulirt werden konnte. An dem oben an der Kapsel befindlichen Hahne wurde in horizontaler Lage ein in 0,02 ccm getheiltes Glasrohr angebracht, welches bis zu seinem Nullpunkte Wasser enthielt. Vor dem Beginne jedes Versuches wurde aus dem Hahne d soviel Quecksilber abgelassen, dass sich dessen Niveau mit dem oberen Rande des unteren Stahltheiles in einer Ebene befand. Darauf wurde das Holz unter Wasser von anhaftender Luft möglichst befreit und in die mit frischem Flusswasser (cfr. Satz 2, Folg. 1) gefüllte Kapsel eingeschraubt. Zunächst wurde der Hahn c geschlossen; bei der Oeffnung des Hahnes b wirkte der Quecksilberdruck auf das Wasser im Apparat. Darauf wurde der Hahn wiederum geschlossen und die durch den oberen Hahn ausströmende Wassermenge im graduirten Rohre gemessen.

2. Ueber die Ausflussgeschwindigkeit des Wassers aus der Kapsel.

Das durch die Expansion der Binnenluft erfolgende Ausströmen des Wassers geht, wie es nach dem Torricelli'schen Theoreme zu erwarten ist, im Grossen und Ganzen in allmählich verlangsamter Geschwindigkeit vor sich. Im Augenblicke des Hahnöffnens schnellt aus dem Apparate eine Wassersäule hervor, welche $^1/_2$ bis $^1/_3$ der ganzen der überhaupt ausfliessenden Menge beträgt. In vibrirender Bewegung scheint das Wasser einen Augenblick anzuhalten, um darauf eine sicher messbare Geschwindigkeit anzunehmen. Ich hatte anfangs im Sinne, die Grösse dieser ersten Quantität bei allen Versuchen zu bestimmen; doch es belehrten mich die oft erheblichen Abweichungen in den Ablesungen eines andern Beobachters, dass die so zu erlangenden Werthe zu unsicher seien. So nahm ich denn von der Bestimmung dieser Grösse Abstand. Einige Beispiele werden den Vorgang des Ausströmens verdeutlichen. In je 30 Sec. strömten nach einer Compression von 1 Minute folgende Wassermengen aus, welche 0,001 ccm bedeuten:

a) 2140, 170, 85, 65, 50, 40, 30, 20, 20, 20, 20, 20,
b) 1000, 65, 35, 25, 20, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 5,
c) 630, 280, 55, 30, 15, 15, 15, 10, 10, 10, 7, 5, 5, 5,
d) 610, 230, 65, 60, 40, 25, 20, 15, 15, 15, 10, 9, 9, 9,

Der Beobachtungsfehler beträgt gegen das Ende jeder Reihe + 2,5; am Anfang ist er infolge der durch schnellere Bewegung erschwerten Beobachtung grösser.

3. Das Zustandekommen des ungleichförmigen Ausfliessens.

Schon ein flüchtiger Blick auf die Zahlenreihe zeigt, dass die Ausflussmengen nicht allein durch das Torricelli'sche Theorem erklärt werden können. Noch andere Umstände müssen Einfluss ausüben.

a) Die anfangs hervorschnellende Wassermenge ist grösstenteils Funktion der im Augenblicke des Hahnöffnens im Holze noch vorhandenen comprimirten, aber nicht absorbirten Luftmenge. Denn bei dem Ueberdrucke von 2 Atmosphären wird höchstens ein Luftvolumen, welches 10 % der im Holze enthaltenen Wassermenge beträgt, absorbirt.

b) Die darauf austretende Wassermenge wird bedingt durch die der Druckverminderung entsprechende innerhalb des Holzes erfolgende Luftabgabe des Wassers. Ihr Austritt ist etwa in drei Minuten vollendet.

Die mit der Compression verbundene Wärmeerzeugung (Mariotte-Gay-Lussacsches Gesetz) und die jener entsprechende, bei der Expansion der Luft erfolgende Abkühlung üben wohl auf die Ausflussmengen keinen erheblichen Einfluss aus.

c) Die Erklärung der Thatsache, dass die Ausflussgeschwindigkeit schliesslich in eine annähernd Constante übergeht, bereitete anfangs Schwierigkeiten. Da die Erscheinung durch Vorgänge innerhalb des Holzes nicht verursacht sein konnte, wurde der Apparat einer genauen Prüfung unterworfen, welche ergab, dass der Hahn b nicht immer gleichmässig schloss. Die dadurch entstandene Fehlerquelle darf während eines Versuches als constant wirkend angenommen werden; doch muss diese Fehlerconstante für jeden Versuch von Neuem bestimmt werden. Zur Erlangung einer definitiven Ausflussmenge würde also eine derartige Correctur anzubringen sein, dass von der Summe der einzelnen Wassermengen, welche vor dem Eintritte der Gleichförmigkeit ausflossen, zu subtrahiren ist das Product aus dem arithmetischen Mittel der zuletzt beobachteten (annähernd gleichen) Mengen in die Zahl der vorausgehenden einzelnen Beobachtungen.

4. Ueber die Verschiedenartigkeit der Resultate, welche nacheinander von demselben Holzstücke gewonnen wurden.

Aus verschiedenen Gründen erschien eine Wiederholung des Versuches an demselben Holze erforderlich. Ein Cylinder der gewöhnlichen Grösse wurde je 1 Minute dem Drucke ausgesetzt und die jedes Mal ausfliessende Wassermenge bestimmt. Nach Anbringung der besprochenen Correktur ergaben sich die Ausflussmengen:

1,63. 1,65. 1,57, 1,55, 1,55, 1,47, 1,46, 1,43, 1,44, 1,46, 1,43, 1,42, 1,37, 1,37, 1,32.

Nach einem nur 30 Sec. lang wirkendem Drucke wurde eine Ausflussmenge von 1,31 beobachtet. Es scheint also diese kurze Dauer für die Compression völlig ausreichend zu sein. Als ich

dagegen nur 10 Sec. lang comprimirte, floss die offenbar zu geringe Menge von 1,23 aus.

Die ersten beiden Beobachtungen zeigen ein Wachsen der Ausflussmenge; die während der ersten Minute wirkende Compression genügt also noch nicht, alle Widerstände für die Beweglichkeit des Wassers zu beseitigen. Infolge dessen musste bei jedem Holzstück die Compression und Dilatation der Luft so oft wiederholt werden, bis die Ausflussmengen ein Maximum zeigten.

Die in obiger Zahlenreihe an jeder weiteren Beobachtung erkennbare Verkleinerung des Luftvolumens im Holze findet nach Satz 2, Folg. 1 darin ihre Erklärung, dass bei der jedesmal stossweise erfolgenden Dilatation der nicht absorbirten Luft das vorher eingedrungene Wasser etwas Luft im absorbirten Zustande entführte. Diese sammelt sich allmählich zu kleinen Bläschen in der über dem Hahne c (Fig. 4) befindlichen Biegung des Glasrohres.

Aus diesem Umstande muss an dem zur Berechnung des Luftvolumens im Holze erforderlichen Werthe der maximalen Ausflussmenge ausser der bereits oben mitgetheilten Correktur noch eine zweite angebracht werden; er muss vermehrt werden um das Produkt aus dem arithmetischen Mittel der Differenzen der Ausflussmengen nach Eintritt des Maximum in die Zahl der bis zum Eintritt desselben angestellten Beobachtungen.

5. Chemische Beschaffenheit der Binnenluft.

Die chemische Beschaffenheit der Binnenluft ist wenig bekannt und aus diesem Grunde sind die Resultate meiner Spannungsbestimmungen nicht einwurfsfrei: ein grösserer Kohlensäuregehalt der Binnenluft würde sich im Resultate als stärkere Luftverdünnung geltend gemacht haben. Da eine gleichzeitige chemische Analyse der Binnenluft leider unausführbar war, so wurden die seiner Zeit von Böhm (Landwirthschl. Stationen XXI 1878) ermittelten Resultate, nach denen die Kohlensäure nur bei absterbendem Holze reichlicher auftritt, den Untersuchungen zu Grunde gelegt. Seine Methode, aufthauende Zweige auszupumpen, besitzt insofern einen grossen Uebelstand, als die leicht difundirbaren Gase zuerst aus dem Holze treten; auch ist sie auf gefässlose, mit behöften Tüpfeln versehene Pflanzen möglicherweise gar nicht anwendbar. Ich habe infolge dessen zur Trennung des Holzes von seiner Binnenluft den Weg eingeschlagen, frisches Holz in einer eisernen pneumatischen Wanne mit Hilfe einer in derselben angebrachten Schraubzwinge unter Quecksilber zu zermalmen und die dabei entweichenden Luft- und Wassermengen über Quecksilber zu sammeln. Durch wiederholtes Tränken des Holzes mit luftfreiem Wasser und darauf erfolgendes Auspressen gewinnt man leicht Luftmengen, welche für die Geppert'sche physiologische Gasanalyse vollständig genügen.

ad E 1. Ueber das Verdunsten des Wassers bis zur vollendeten Wägung.

Zur Bestimmung der Wassermenge, welche bis zur vollendeten Wägung durch Verdunstung verloren geht, brachte ich den Holz-

cylinder auf die Waage und bestimmte in den folgenden 2 Stunden 22 Mal sein Gewicht. Als arithmetisches Mittel ergab sich, dass die Verdunstung von 0,02 gr Wasser in 2 Min. 30 Sec. erfolgte. 4 Stunden nach Beginn der Wägung verdunsteten 0,02 gr in 4 Min. und nach 19 weiteren Stunden 0,02 gr in 6 Min. Im Ganzen verlor das Stück in 23 Stunden 6,505 gr Wasser, während ursprünglich sein Frischgewicht 31,385 gr betrug. Freilich wurde eine gleichzeitige Beobachtung der Temperatur, des Feuchtigkeitsgehaltes und des Druckes der Luft nicht angestellt. Dennoch hielt ich es für richtig, jede Wägung derartig zu corrigiren, dass für das Verstreichen von je 1 Min. 15 Sec. vor ihrer Beendigung 0,01 gr Wasserverlust in Ansatz gebracht wurde.

2. Ueber das Abtrocknen des Holzes.

Von dem adhaerirenden Wasser wurde das Holz dadurch befreit, dass es in Fliesspapier eingehüllt und unter leichtem Drucke mit den Händen getrocknet wurde. Ein so behandelnder Cylinder ergab in einem Falle das Gewicht von 31,150 gr. Darauf wurde er nochmals, doch mit Anwendung eines stärkeren Druckes getrocknet und wog nun 31,095 gr. Das wäre ein Fehler von 0,1807 %.

Sollte es sich herausstellen, dass diese Fehlerquelle bedeutend grösser ist, als sie nach diesem Versuche zu sein scheint, so lassen sich genauere Resultate auf folgendem Wege erreichen. Eine Wägung des Holzes unter Wasser lässt sich sehr leicht mit grosser Genauigkeit ausführen; da auch sein Volumen bestimmbar ist, lässt sich sein absolutes Gewicht berechnen. Zugleich wäre ein Constantbleiben des Gewichtes unter Wasser ein sicheres Kennzeichen für Vollendung der Saugung.

ad. F. Der Berechnung ist das Boyle-Mariotte'sche Gesetz zu Grunde gelegt. Freilich wird bei dem Versuche eine Luftmenge comprimirt, welche von den die Wärme schlecht leitenden Holzwänden eingeschlossen ist. Infolge der Wärmeentwicklung wird daher bei einem Ueberdrucke von 2 Atmosphären die Compression auf $^1/_3$ des ursprüngiichen Volumens nicht völlig gelingen. Eine Bestimmung der Grösse des Fehlers war leider unausführbar; jedenfalls würde aber eine Anwendung des Mariotte-Gay-Lussac'schen Gesetzes über die Compression der in adiathermaner Hülle eingeschlossenen Gase zu noch ungenaueren Resultaten geführt haben.

ad H. In Ermangelung eines R. Hartig'schen Xylometers wurde die Volumetrirung des Holzes in einem engen Messcylinder vorgenommen. Da das Holz bereits vollgesogen war, so wurde der sonst unvermeidliche, durch Aufsaugung von Wasser veranlasste Fehler vermieden.

ad K. Bei der Imbibition des Holzes findet theoretisch eine Volumenverminderung durch Verdichtung statt,*) indem das Gesammtvolumen des imbibirten Holzes kleiner als die Summe der

*) cfr. Sachs, Ueber die Porosität des Holzes, Separatabdruck, p. 16.

Volumina des Wassers und der trockenen Holzsubstanz ist. Es wäre daher eigentlich zu einer derartigen Berechnung die Kenntniss des specifischen Gewichts der mit Wasser imbibirten Holzsubstanz erforderlich, welches zur Zeit noch nicht bekannt ist.

Ueber den Verschluss von Bohrlöchern.

Bohrlöcher, die mit einem 18 mm weiten Centrumbohrer hergestellt waren, verschloss ich anfangs mit einem durchbohrten Korken; doch gab ich dies bald auf, da durch ihn die jüngsten Partieen des Holzes verschlossen wurden. Statt dessen stellte ich zunächst auf der Rinde eine ebene Fläche her oder entfernte bei stärkeren Stämmen die Rinde gänzlich. Nach Herstellung des Bohrloches wurde nun auf den eingefetteten Rand ein breiter und weicher Gummiring gelegt und gegen diesen vermittelst um den Stamm gezogener Eisendrähte ein abgeschliffener Glastrichter gepresst.

Letzterer wurde in einigen Fällen durch ein schief abgeschliffenes Standgefäss ersetzt, welches in seinem Gummistopfen einen Thermometer und ein Glasrohr aufnehmen konnte. — Manometerspitzen, selbst dolchartige (cfr. Schwendener II, p. 583, 584) wurden stets in Bohrlöchern befestigt. Der Rand der Bohrlöcher wurde eingefettet, darauf die Metallspitze lose eingesetzt und mehrere Secunden lang Wasser hindurch gepresst, um die Luft aus dem Bohrloche zu entfernen. Darauf wurde das Manometer tiefer in das Holz getrieben und mit Wachs verkittet. Als Fett verwandte ich Lanolinum pur. anhydr. (Liebreich), welches selbst an feuchtem Holze haftet und dadurch das Wachs festhält.

Die Anregung zu vorliegenden Untersuchungen verdanke ich Herrn Professor Dr. E. Russow in Dorpat und Herrn Professor Dr. S. Schwendener, dem Leiter des Botanischen Instituts der Berliner Universität. Bei der Ausführung der Arbeit unterstützte mich besonders Letzterer durch sein warmes Interesse und die in freundlichster Weise ertheilten Rathschläge, besonders durch die strenge Kritik, die er an den von mir versuchten Deutungen der Experimente geübt hat, wofür ich ihm auch an dieser Stelle meinen ehrerbietigsten Dank ausspreche.

Die erforderlichen Versuche machte ich zum Theil während des Sommers 1889 in der Forstwissenschaftlichen Versuchsanstalt auf dem Adlisberge bei Zürich, wo Herr Forstrath Bühler mich für die Ueberlassung der zu diesen Untersuchungen erforderlichen Edeltannen zu grossem Danke verpflichtete. Bei weitem die meisten Versuche führte ich in den Herbstmonaten der Jahre 1888 und 1890 im Forstreviere Petersdorf im Riesengebirge aus, wozu mir der dortige Oberförster, Herr Bormann, in der wohlwollendsten und meine Studien fördernden Weise die Erlaubniss gab. Ich kann auch nicht umhin, Herrn Meyer, dem Werkführer der Holzschleiferei von G. H. Enge in Petersdorf, für seine bereitwillige und umsichtige Unterstützung bei den technisch oft sehr schwierigen Versuchen meinen Dank auszusprechen.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

I. Hydromechanische Betrachtungen.

Schema (S. 8). 1) Einpressen von Wasser in Holz unter Compression der Binnenluft (9). 2) Austritt desselben unter Dilatation der Binnenluft (9). 3) Einpressen von Luft (10). 4) Aussaugen von Wasser (11). 5) Compression der Binnenluft bei Filtration (11). 6) Einsaugung gefärbter Flüssigkeiten bezüglich ihrer Steighöhe (12). 7) Sättigung der Saugkraft bezüglich ihrer Abhängigkeit von Zeitdauer und Grösse der Saugfläche (12).

II. Methode zur Bestimmung der Binnenluftspannung.

Die theoretische Grundlage der Methode (12). Ihr Gang durch ein Beispiel erläutert (14). Ergebnisse der an einer Edeltanne angestellten Spannungsbestimmungen (17). Bedeutung der Resultate mit Bezug auf einige der neueren Ansichten über die Ursache des Saftsteigens (17). Vorkommen grosser Druckdifferenzen in benachbarten Holzpartien (18).

III. Ueber die Beweglichkeit des liquiden Wassers im Splintholze.

Geringer Werth der Filtrationsversuche (19). Sättigung des Holzes durch Wasser mit Hilfe des Atmosphärendruckes (20) und mit Hilfe stärkerer Drucke (22). Ursachen des Sättigungsverzuges sind weniger die Hoftüpfel (23) als die Discontinuität des Baumsaftes (25). Schwankungen in der Saugungsintensität und deren Ursachen (26). Versuch der annähernden Bestimmung der Grösse von den continuirlichen Saftgebieten (27). Widerstand der Jamin'schen Ketten (29). Unausführbarkeit der Herstellung einer Communication zwischen Bohrlöchern (29). Tangentiale Querfiltration (32). Funktion der Hoftüpfel (33). Bedingungen für ihren Verschluss durch Druck und durch Aspiration (34).

IV. Resultate der Spannungsbestimmungen.

Entstehung der luftverdünnten Räume nach den physikalischen Theorien und nach der vitalen Theorie (36). Constante Markstrahlfunktion (37). Periodische Markstrahlfunktion (37). Zusammenstellung der Resultate (38).

V. Zusätze.

Vita.

Natus sum Carolus Fridericus Julius Pappenheim Berolini a. d. III. Id. Febr. anni h. s. LXV patre Eugenio, matre Agnete de gente Uschner, quam iam morte mihi ereptam valde lugeo. Fidem profiteor evangelicam.

Gymnasium patriae frequentavi „Colonienſe“, quod dicitur, cuius in ordine magistrorum pater adhuc est. Maturitatis instructus testimonio vere anni LXXXVII inter cives academicos almae Fridericae Guilelmae Berolinensis receptus philosophorum ordini inscriptus sum. Autumno illius anni contigit mihi, ut a Gustavo Teichmuellero, viro praeclarissimo, familiaritate mihi coniuncto, nunc praematura morte defuncto invitatus Dorpatum me conferrem, ubi per duos menses universitatis illustrissimae litterarum studia, quae nullisdum perturbationibus vexabantur, videbam summamque meam in utilitatem percipiebam. Deinde rursus Berolini litteris operam dedi. Per semestre aestivum anni LXXXIX Turici maxime in rerum naturalium studiis versatus sum. Ex Alpibus redux philosophorum universitatis Berolinensis ordini insciptus sum.

Magistri academici mihi fuerunt viri doctissimi et illustrissimi: Berolini: Ascherson, E. du Bois-Reymond, Dilthey, Ebbinghaus, Engler, Harnack, Hartmann, A. W. de Hofmann, Lasson, Klein, Korschelt, Kossel, Kny, Kundt, Magnus, Netto, Paalzow, Paulsen, Preyer, Rammelsberg, Reinhardt, de Richthofen, Rinne, F. E. Schulze, Schwendener, Simmel, Zeller: Dorpati: Arthur de Oettingen, Russow, Teichmüller(†); Turici: Kenngott, A. Meyer, Schoch, Schröter, Stein, Stöhr, Stoll. Quibus omnibus viris optime de me meritis summas ago gratias.

Thesen.

I.

Die Bedeutung der Hoftüpfel für das Leben der Pflanzen ist noch nicht vollständig erkannt.

II.

Die Physiologie vermag durch Experiment und Messung eine exacte Grundlage zu gewinnen.

III.

Für den Elementarunterricht in der Naturgeschichte der Lebewesen empfiehlt es sich, auf die zweckmässigen Einrichtungen im Bau der Organe hinzuweisen.

Figurenerklärung.

Fig. 1. 2. 3. Schematische Darstellung der Vertheilung des Wassers und der Luft in den Tracheïden.

Fig. 4. Apparat zur Compression der Tracheidenluft. Das zu untersuchende Holz befindet sich schwimmend in Wasser im stählernen, kapselartigen Theil des Apparates. Bei b mündet die Druck ausübende Quecksilbersäule. Durch Oeffnen des Hahnes c wird das unter Einwirkung des Quecksilberdruckes in das Holz gedrungene Wasservolumen gemessen. Hahn a führt zu einem Wasserreservoir.

Fig. 5. aa. Zwei luftdicht aneinander schliessende Glasglocken. In dem Tubus der einen befindet sich eine zur Längsaxe der Glasglocken rechtwinklig gebogene, in 0,02 ccm. getheilte Bürette. — bb ist eine grosse, starkwandige, tubulirte Glasglocke, deren nach oben gewandte Oeffnung durch eine mattgeschliffene Glasglocke verschlossen wird. Vom Tubus der Glocke führt ein Glasrohr zu einem Wasserreservoir; das aus dem Behälter g herabfliessende Quecksilber presst das in f befindliche Wasser in die Glocke bb.

Fig. 6. Evacuierung eines Bohrloches vermittelst der Quecksilberluftpumpe. Die Evacuirung erfolgt durch Senkung des Behälters d und Verbindung der in e befindlichen Torricellischen Leere mit dem Innern des Bohrloches. mm ist ein als Manometer dienendes Gefässbarometer. t ist ein Dreiweghahn.

Fig. 7. 8. Ein durch Trichter resp. abgeschliffenes Standgefäss verschlossenes Rohrloch.

Fig. 9. Schematische Darstellung der Vertheilung des Wassers und der Luft in den Tracheiden. Die Bildung continuirlicher Fäden in der Faserrichtung kann leichter erfolgen als in einer Richtung senkrecht dazu.

Fig. 10. Bohrloch mit Manometerröhrchen, zur Nachfüllung eingerichtet. Das Innere des mit Trichter verschlossenen Bohrloches communicirt mit dem vertikal oder horizontal zu stellenden graduirten Röhrchen rr. Die Nachfüllung desselben geschieht vermittelst des Dreiweghahnes d aus der grossen Bürette b.

Fig. 11. Apparat zur Beobachtung von Saugung und Blutung. Er besteht im wesentlichen aus einem sich gabelnden Manometerröhrchen; jeder Schenkel der Gabelung enthält ein durch einen Quecksilbertropfen hergestelltes, im entgegengesetzten Sinne funktionirendes Klappenventil. Die durch jedes der Ventile eventuell hindurchgeflossene Wassermenge kann nachträglich ihrem Volumen nach bestimmt werden. r ist ein Reservoir, welches das im Trichter n befindliche Wasserniveau in constanter Höhe erhält. Bei b communicirt der Apparat mit einem Bohrloche.

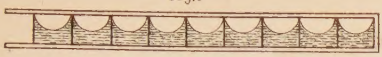
Fig. 1

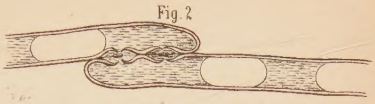
Fig. 2

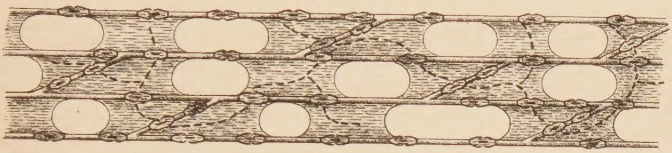
Fig. 3

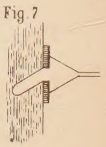
Fig. 7

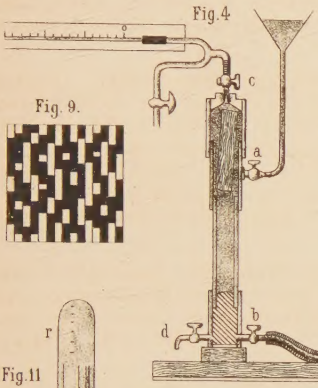
Fig. 4
c
a
d
b

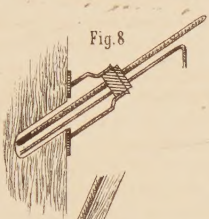
Fig. 8

Fig. 9.

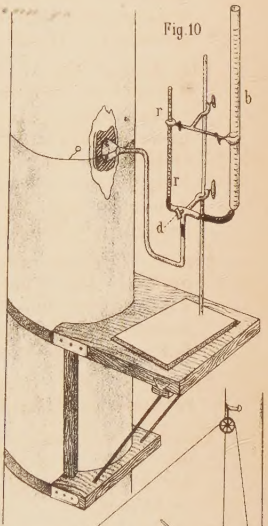
Fig. 10
r
b
r
d

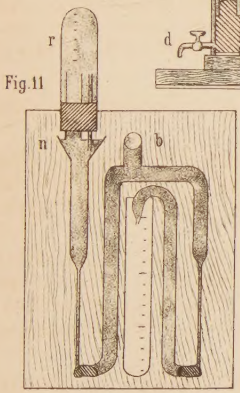
Fig. 11
r
n
b

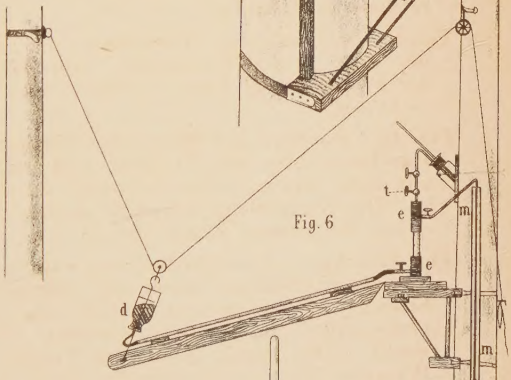
Fig. 6
t
e
m
e
d
m

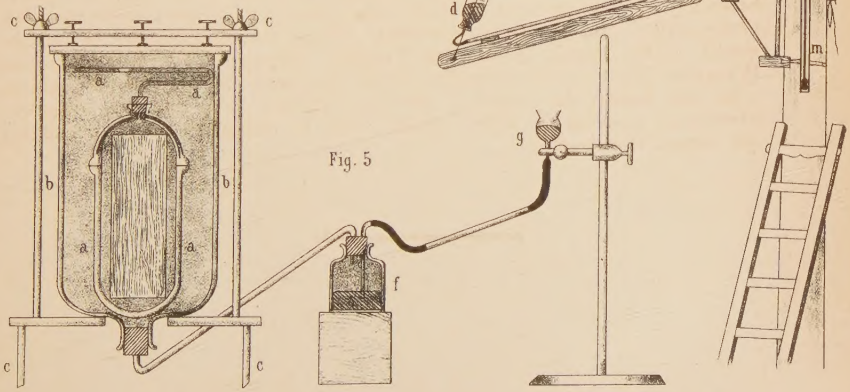
Fig. 5
c
c
a
a
b
b
a
a
c
c
g
f